

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Mouloud MAMMERY de Tizi-Ouzou

Faculté du Génie de la Construction

Département de Génie Mécanique



Mémoire de fin d'études

Master en Génie Mécanique

Option : Fabrication Mécanique et Productique

Thème :

Conception et fabrication d'un four de frittage tubulaire sous
atmosphère contrôlée

Réalisé par :

MAMOUNI YACINE

YAHY KARIM

Dirigé par :

Mr. M. NECHICHE

Promotion : 2023/2024

Remerciement

Nous tenant tous d'abord à remercier le grand dieu de nous avoir donné la force et le courage de dépasser tous les obstacles pour réaliser et mettre au point ce mémoire de fin d'études.

On tient à remercier vivement dans un premier temps notre encadreur Mr NECHICHE de nous avoir gracieusement fait bénéficier tout au long de ce travail de ses précieuses connaissances et de sa longue expérience et qui sans son aide et conseils, l'accomplissement du projet n'aurait pas été possible.

On adresse également nos remerciements les plus sincères aux personnels du hall de technologie pour leur patience et contribution à la réalisation de notre travail.

Aussi, nous tenons à exprimer notre reconnaissance à tous nos amis et collègues pour tout leur soutien.

Dédicace

Je dédie ce travail a :

*A mes **chers parents** pour leur support, encouragement, leur soutien constant et les encouragements qui ont été la source de ma force et de ma détermination tout au long de ce parcours.*

*A mes amis, notamment **HADDADI ABDELLAH** qui été là dans les hauts et les bas de ce voyage. Votre camaraderie, vos rires et votre soutien m'ont aidé à surmonter les défis. Merci d'avoir partagé ces expériences avec moi*

*A mon cher binôme **YAHY KARIME**, je dédie cette réussite pour sa collaboration, son engagement et sa contribution précieuse tout au long de ce projet.*

A toute la promotion 2023/2024.

YACINE

Dédicace

Je dédie ce travail a :

*A mes **chers parents** pour leur support, encouragement, leur soutien constant et les encouragements qui ont été la source de ma force et de ma détermination tout au long de ce parcours.*

*A mes amis, notamment **HADDADI ABDELLAH** qui été là dans les hauts et les bas de ce voyage. Votre camaraderie, vos rires et votre soutien m'ont aidé à surmonter les défis. Merci d'avoir partagé ces expériences avec moi*

*A mon cher binôme **MAMOUNI YACINE**, je dédie cette réussite pour sa collaboration, son engagement et sa contribution précieuse tout au long de ce projet.*

A toute la promotion 2023/2024.

KARIM

Sommaire

Introduction générale	1
Etude théorique	
Chapitre I : Généralité sur la conception des systèmes mécaniques	
I. Introduction	5
II. Définition de la conception mécanique	5
III. Définition d'un système mécanique	5
IV. Types des mécanismes introduit dans les systèmes mécaniques	6
V. Processus de la conception	6
V.1 La phase d'étude.....	6
V.2 La conception.....	6
V.3 Le dossier technique	7
V.4 La réalisation.....	7
V. 5 L'industrialisation	7
VI. La conception mécanique dans l'entreprise	7
VI.1 La direction générale.....	7
VI.2 Le bureau d'étude	7
VI.2.1 Les principaux acteurs du bureau d'études	8
VI.3 La gestion de la fabrication	8
VI.4 Bureau de méthodes	8
VI.5 Elaboration du produit.....	9
VI.5.1 Période de conception.....	10
VI.5 .2 Période de production	10
VI.5.3 Période de marché	10
VI.6 Méthodes de conception mécanique	10
VI.6.1 La méthode simple	10
VI.6.2 La méthode cyclique.....	11
VII. Méthodes et outils d'amélioration de la phase d'analyse et de conceptions	11
VII.1 L'intelligence fonctionnelle.....	11
VII.2 La méthode de QFD.....	12
VII.3 La méthode de SADT	12
VIII. Types de conception	12
VIII.1 La conception créative	12
VIII.2 La conception innovante	12

VIII.3	La conception habituelle.....	12
IX.	Le cahier de charge fonctionnel (CDCF).....	13
IX.1	Définition.....	13
IX.2	Eléments constitutifs d'un CDCF.....	13
IX.2.1	Présentation générale du besoin.....	13
IX.2.2	Expression fonctionnelle du besoin.....	13
IX.2.3	Appel à variation.....	13
IX.3	Forme du cahier de charge fonctionnel.....	14
IX.4	L'utilisation du cahier de charge.....	14
X.	Conception assistée par ordinateur (CAO).....	14
X.1	Définition.....	14
X.2	Objectif de la conception assistée par ordinateur CAO.....	14
X.3	Domaines d'application de la CAO.....	15
X.4	Avantages et Inconvénients de la CAO.....	16
XI.	Conclusion.....	16

Chapitre II : Analyse de la valeur

I.	Introduction.....	18
II.	Importance de l'AV dans la conception des systèmes mécaniques.....	19
III.	Objectifs de l'AV.....	20
IV.	Méthodologie de l'analyse de la valeur.....	20
V.	L'analyse fonctionnelle.....	21
V.1	Les types de l'analyse fonctionnelle.....	21
V.2	Les étapes de l'analyse fonctionnelle.....	21
VI.	Outils et techniques utilisés dans l'AV.....	23
VII.	Application de l'analyse de la valeur aux systèmes mécaniques.....	24
VIII.	Optimisation et mise en œuvre des solutions.....	27
IX.	Études de cas et exemples concrets.....	28
X.	Conclusion.....	29

Chapitre III : Frittage

I.	Introduction.....	31
II.	Définition du frittage.....	31

III.	Les stades du frittage.....	31
IV.	Différents types de frittage	33
IV.1	Frittage à l'état solide	33
IV.2	Frittage en phase liquide.....	34
IV.3	Frittage activé	34
V.	Applications du frittage.....	35
V.1	Céramique.....	35
V.2	Métallurgie.....	35
V.3	Composites.....	35
V.4	Métallurgie des poudres.....	36
V.5	Impression 3D/Fabrication Additive	36
V.6	Électronique et génie électrique	36
VI.	Types des fours de frittage.....	37
VI.1	Fours à atmosphères	37
VI.2	Fours sous vide	37
VI.3	Structure du Four	37
VI.4	Technologies Avancées	37
VII.	Conclusion.....	38

Fabrication du prototype

Chapitre IV : Conception et réalisation du prototype

I.	Introduction.....	41
II.	Fonctionnement du four.....	41
III.	Description du four	42
IV.	Présentation des éléments constitutifs.....	44
IV.1	La table du four	44
IV.2	Le boîtier de commande	45
IV.3	Le corps du four	47
IV.3.1	Le tube du four	48
IV.3.2	Éléments chauffants	48
IV.3.3	Système d'isolation thermique.....	49
IV.4	Système d'alimentation électrique et de régulation	50
IV.5	Système de contrôle de l'atmosphère	51
IV.6	Présentation des pièces usinées.....	53

IV.6.1 Extrémité du tube	53
IV.6.2 Emplacement du thermocouple.....	54
IV.6.3 La bague du joint.....	54
IV.6.4 Collier de serrage	55
IV.6.5 Les supports du tube.....	55
IV.6.6 Plaque réfractaire.....	56
IV.6.7 Dispositif de gestion du gaz.....	56
IV.6.8 Entrée du gaz.....	57

Chapitre V : Mise à l'essai

I. Dessins de définitions.....	59
II. Fiche technique	59
II.1 Principale caractéristique technique	59
II.2 Eléments de contrôle du four	59
III. Mode d'emploi.....	60
IV. Conclusion	61

Chapitre VI : Présentation du projet startup

I. Introduction	63
II. L'idée du projet.....	63
III. Présentation du projet.....	64
IV. L'objectif du projet	64
V. Les aspects innovants	64
VI. Domaines d'Activité.....	65
VII. Horizons du projet	65
VIII. Clients potentiels	66
IX. Responsables du projet.....	66

Conclusion générale.....	68
--------------------------	----

Liste des figures

Chapitre 1

Figure I.1 : les services de l'entreprise industrielle.....	9
Figure I.2 : Processus d'élaboration d'un produit.....	10
Figure I.3 : Méthode simple en conception mécanique.....	11
Figure I.4 : cahier de charge fonctionnelles.....	13

Chapitre II

Figure II.1 : L'analyse de la valeur.....	19
Figure II.2 : La méthode FAST.....	23
Figure II.3 : La méthode SADT.....	24
Figure II.4 : Acteur du schéma AV.....	27

Chapitre III

Figure III.1 : Évolution de la forme du pore durant le frittage.....	32
Figure III.2 : Séquence de la séparation du pore et de joint de grain.....	33

Chapitre IV

Figure IV.1 : vue d'ensemble des composants.....	43
Figure IV.2 : Les différents composants de l'extrémité du tube.....	44
Figure IV.3 : la table du four.....	45
Figure IV.4 : le boîtier de la commande.....	45
Figure IV.5 : Vue de face.....	46
Figure IV.6 : Vue de droite.....	46
Figure IV.7 : vue de derrière.....	47
Figure IV.8 : le corps du four.....	47
Figure IV.9 : tube en céramique.....	48
Figure IV.10 : Résistance chauffante.....	48
Figure IV.11 : système d'isolation thermique.....	49
Figure IV.12 : Laine d'alumine.....	50
Figure IV.13 : Schéma du câblage.....	50
Figure IV.14 : Schéma du système de régulation de température.....	51
Figure IV.15 : Schéma du système d'atmosphère.....	51
Figure IV.16 : Bouteille du gaz.....	52
Figure IV.17 : Photographie illustrant le manomètre et le débitmètre.....	53
Figure IV.18 : Extrémité.....	53
Figure IV.19 : Emplacement du thermocouple.....	54
Figure IV.20 : Bague du joint.....	54
Figure IV.21 : Collier de serrage.....	55
Figure IV.22 : Support.....	55

Figure IV.23 : Plaque réfractaire.....	56
Figure IV.24 : Dispositif de gestion des gaz.....	57
Figure IV.25 : Entrer du gaz.....	57

Chapitre V

Figure V.1 : Vue générale du tableau de commande du fou.....	..60
---	------



Introduction générale

Introduction générale

Un four de frittage est un dispositif essentiel pour le traitement thermique des compacts de poudre, qu'il s'agisse de poudres métalliques, céramiques ou polymères, selon un cycle de température précis. Étant donné la nature pulvérulente des matériaux et les températures élevées requises pour le frittage, il est crucial que le cycle thermique soit rigoureusement contrôlé afin de minimiser les variations de température à l'intérieur de l'échantillon. De plus, en raison de la faible taille des particules (quelques micromètres) et de leur réactivité, ces traitements thermiques doivent généralement être effectués dans une atmosphère inerte ou protectrice [1]. Cela nécessite des éléments chauffants puissants, une isolation thermique efficace et un système de régulation de température très précis. Par ailleurs, le contrôle de l'atmosphère dans le four doit être fiable pour limiter l'impact d'éventuelles impuretés sur les échantillons. L'objectif de cette étude est de concevoir et réaliser un four spécifiquement destiné au frittage, en réponse à un besoin exprimé par l'équipe de recherche « Élaboration des matériaux par métallurgie des poudres ». Face à l'urgence de cette demande et à la nécessité d'optimiser les coûts, nous avons décidé d'intégrer autant que possible des composants récupérés dans notre conception.

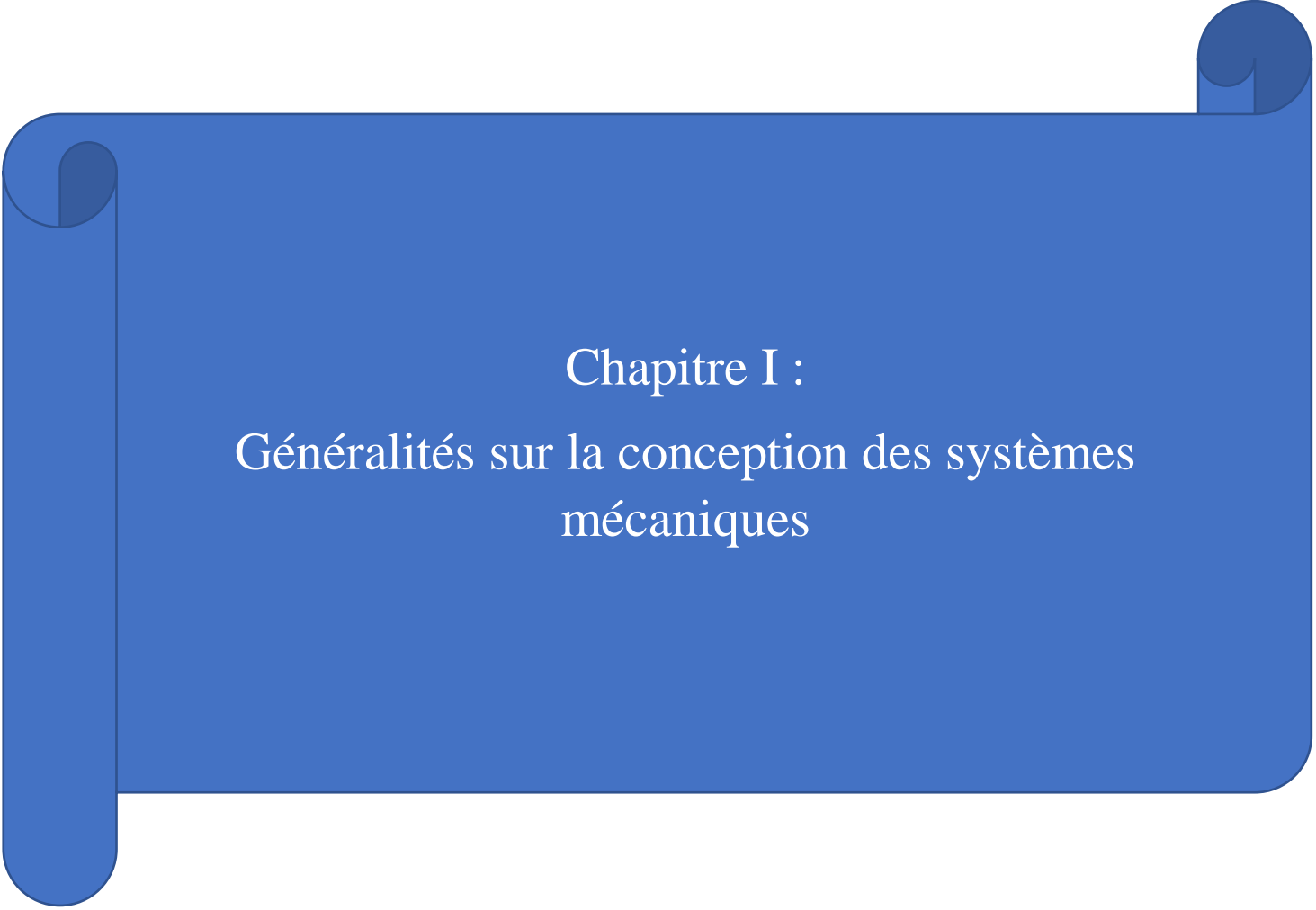
Notre mémoire est composé de trois parties :

- Une étude théorique dans laquelle nous présentons une synthèse bibliographique sur les généralités de la conception des systèmes mécanique au premier chapitre et la méthode de l'analyse de la valeur dans le deuxième chapitre aussi un troisième chapitre sur le frittage.
- Une deuxième partie consacrée à la conception du four dans laquelle nous présentons les différentes solutions technologiques retenues et la fiche technique du four.
- La réalisation du four et sa mise à l'essai sont exposées dans la troisième partie. Dans un premier temps, nous y présentons les plans des différentes pièces à fabriquer et ensuite la mise à l'épreuve du four pour laquelle nous donnons le mode opératoire et les différents réglages pour réaliser un cycle thermique.

Nous terminons ce manuscrit par une conclusion générale et des perspectives

1^{ère} partie

ETUDE THEORIQUE



Chapitre I :
Généralités sur la conception des systèmes
mécaniques

I. Introduction :

La conception des systèmes mécaniques est un processus complexe qui implique la création de systèmes ou de processus répondant à des besoins spécifiques tout en tenant compte des contraintes techniques, économiques et environnementales. Elle est une discipline clé de l'ingénierie mécanique qui vise à concevoir des systèmes mécaniques performants, fiables et durables.

La conception des systèmes mécaniques commence par l'identification des besoins et des exigences du système à concevoir. Cette étape est cruciale car elle permet de définir les objectifs du projet et de déterminer les critères de performance et de qualité. Les besoins peuvent être liés à des aspects tels que la sécurité, la fiabilité, la durabilité, la facilité d'utilisation, la maintenance, la production, la consommation d'énergie, etc.

Une fois les besoins identifiés, la conception mécanique passe à la phase de conception préliminaire. Cette étape consiste à générer des idées et des concepts pour répondre aux besoins identifiés. Les idées peuvent être générées à partir de différentes sources telles que les brevets, les recherches, les expériences, les observations, etc. Les idées sont ensuite évaluées en fonction de leur faisabilité technique, économique et environnementale.

II. Définition de la conception mécanique :

La conception mécanique est une opération essentielle dans la fabrication mécanique, c'est une tâche réalisée par le bureau d'études en vue d'obtention d'un produit ou d'un besoin exprimé par un client, tout cela en suivant une démarche précise pour mettre en disposition un dossier complet qui contient tous les éléments qui définissent le produit.

Ce travail demande une connaissance technique et des qualités personnelles nécessaires pour créer un système ou un processus de réalisation du produit en tenant compte des contraintes existantes.

Dans la conception le projeteur doit évoluer l'avancement de son projet en appliquant sa créativité et son expérience technique, et aussi s'assurer que sa conception soit accessible à la fabrication, son installation et son fonctionnement et satisfaire le besoin du demandeur [1].

III. Définition d'un système mécanique :

Un système mécanique est un ensemble de composants et mécanismes interagissant pour réaliser une fonction mécanique. Ces systèmes peuvent être linéaires, où la somme des

excitations correspond à la somme des réponses. Ils peuvent impliquer divers mécanismes de transmission, tels que les engrenages, les roues dentées et chaînes, les roues de friction, et d'autres... ainsi que d'autres éléments tels que des actionneurs, des capteurs et des contrôleurs.

IV. Types des mécanismes introduit dans les systèmes mécaniques :

Un mécanisme est défini comme une combinaison d'organes et de pièces agencés en vue d'un mouvement ou d'un fonctionnement d'ensemble. Cet assemblage de pièces mécaniques permet la transmission et la transformation de mouvements pour réaliser des tâches spécifiques dans les systèmes mécaniques.

Il existe de nombreux types de mécanismes :

- Mécanisme à roues dentées.
- Mécanisme à roues de friction.
- Mécanisme à poulies et à courroie.
- Mécanisme à roues dentées et à chaîne.
- Mécanisme à vis sans fin et à roue dentée.
- Engrenage.

V. Processus de la conception :

V.1 La phase d'étude :

C'est le point de départ de la conception, il s'agit de rédiger un cahier de charge complet et détaillé, sur lequel le projet va s'appuyer.

Tous commencent par l'analyse du besoin du client puis l'étude de faisabilité ou le maximum d'information est collecté sur le produit, le marché, l'utilisation du produit, ses contraintes, ses objectifs.

V.2 La conception :

La phase suivante du cheminement est celle de la conception. Elle consiste à transformer le besoin en produit. Cette phase doit être suffisamment défini pour pouvoir être installé, fabriqué, construit et être fonctionnel, et pour répondre aux besoins du client.

V.3 Le dossier technique :

Pour assurer l'avancement du projet, il est nécessaire de concevoir un dossier contenant tous les éléments essentiels sur le produit.

Ce dossier technique contient tous les composants du produit, les plans de cotations et les simulations...

V.4 La réalisation :

C'est le passage de la planification à l'exécution du projet, dans cette étape on englobe un ensemble d'activités allant de l'usinage, la fabrication, l'assemblage, le contrôle qualité et la mise en service des équipements.

V.5 L'industrialisation :

L'industrialisation c'est la dernière phase de la conception dans laquelle on met en place les moyens et les méthodes industrielles qui permettront la production du produit, aussi dans cette étape il est conseillé d'effectuer des tests sur le produit ou la mise en marche de la machine afin de permettre la validation de la qualité de ces derniers.

VI. La conception mécanique dans l'entreprise :

La conception et la production mécanique dans une entreprise est un processus crucial pour le développement de produits, pour effectuer cette tâche l'entreprise présente un plan de travail qui définit l'organisation des étapes qui respect les délais de travail et de finalisation du produit.
[2]

Les services entrants dans cette organisation sont :

VI.1 La direction générale :

Chargée des plannings à long terme, des politiques financières, du personnel, du marketing...

VI.2 Le bureau d'étude :

C'est le responsable principal de la conception, il est chargé de réaliser des études techniques et de concevoir un produit ou un projet à partir des besoins d'un client en prenant compte une série de variables et d'informations pour opter une solution optimum pour leur client par exemple :

- **La notion de l'environnement** : dans lequel le produit sera utilisé par exemple : Dans un environnement humide ou chaud, le matériau utilisé n'est pas le même.
- **La notion de sécurité** : si le produit est une machine il faut penser à la sécurité des opérateurs on prévoit des grilles de protection et ne pas avoir de morceaux tranchants qui dépassent...
- **La notion du budget** : réaliser le produit du client avec un minimum de dépenses [3]

VI.2.1 Les principaux acteurs du bureau d'études :

Dans le bureau d'étude on distingue trois postes de travail principal sont :

- **L'ingénieur d'étude** il est responsable de faire l'étude du projet et de la confie au projeteur et présente l'étude au client, il s'assure que le coté contractuelle est respecté. [1]
- **Le dessinateur d'étude** finalise le dossier de définition, et réalise les dissens d'ensembles et définitions de différents éléments du produit.
- **Le projeteur** assiste l'ingénieur en tous ce qu'est technique et fait un compte rendu sur les problèmes rencontres et les solutions proposes, et encadre le dessinateur, il peut être en contact avec le client, les fournisseurs et autres services de l'entreprise. [1]

VI.3 La gestion de la fabrication :

Comprenant la gestion de production (ordonnancement), la maintenance, la gestion des stocks et des en-cours, et la préparation des fabrications où bureau des méthodes. [3]

VI.4 Bureau de méthodes :

Le bureau des méthodes est responsable de l'étude et la préparation à la fabrication (Analyse de fabrication, études de moyens, des temps et l'usinage des pièces). [5]

Les deux bureaux (études et méthodes) travaillent en étroite collaboration en disposant de :

- Dessin du produit à fabriquer.
- Programme de fabrication en termes de qualité, rythmes et délais.
- Moyens mis en place.

Pendant l'analyse de fabrication, le préparateur doit tenir compte :

- Réalisation selon le procédé définis.
- Les tolérances et spécifications fixées doivent être respectées.

- Du coût de fabrication à minimiser.
- L'ouvrier doit travailler dans des conditions normales.

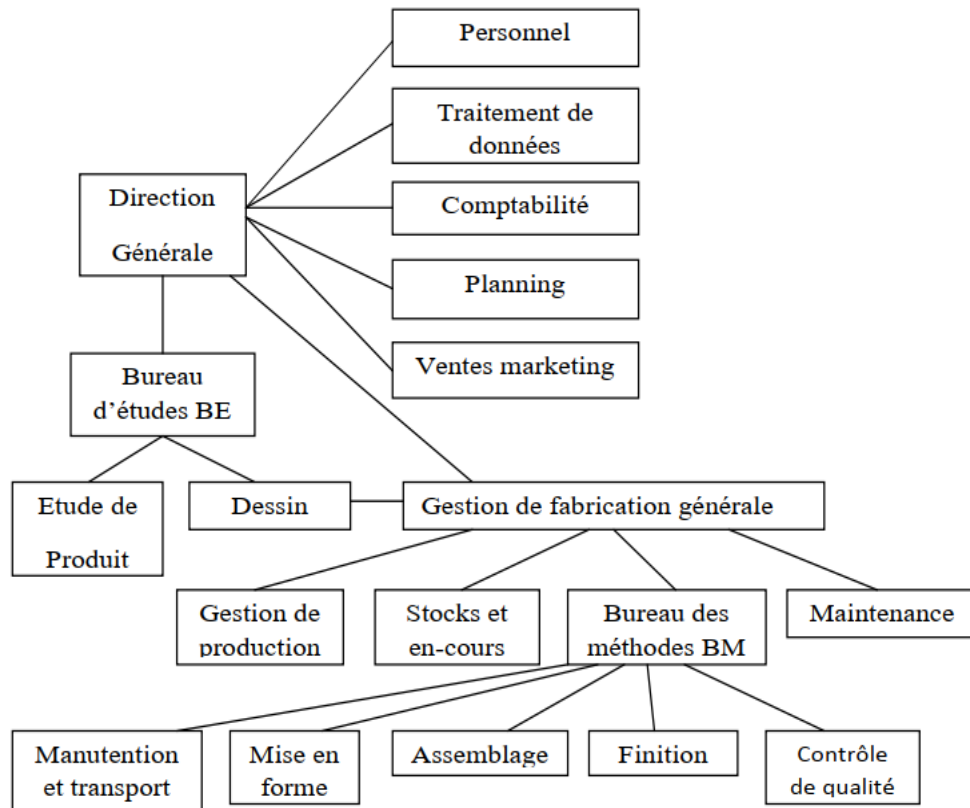


Figure I.1 : les services de l'entreprise industrielle.

VI.5 Elaboration du produit :

Pour avoir une place dans le marché et satisfaire le client l'entreprise doit présenter une meilleure qualité du produit, pour atteindre cet objectif il est nécessaire qu'elle prenne en compte certain critère (la durabilité, la sécurité, l'ergonomie, les performances du produit) et pour garantir sa viabilité sur le marché l'entreprise doit intégrer l'optimisation des couts de production et la facilite de maintenance.

L'élaboration du produit distingue trois périodes essentielles (Conception, production, marché).

[6]

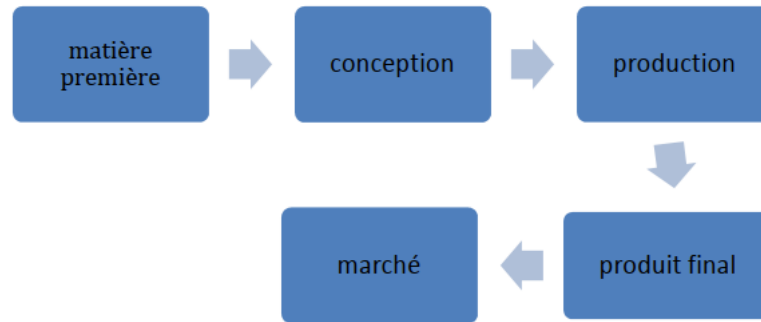


Figure I.2 : Processus d'élaboration d'un produit.

VI.5.1 Période de conception :

Une source d'informations qui détermine le produit et exprime les besoins du client à l'aide d'un cahier des charges.

VI.5.2 Période de production :

Etape de planification de la production et de la fabrication, qui permettent de transformer les matières premières achetées en un produit fini prêt à être mis sur le marché.

VI.5.3 Période de marché

Dans cette étape le produit final sera transmis de l'entreprise vers le marché pour le vendre [7].

VI.6 Méthodes de conception mécanique :

Pour réaliser un système mécanique d'une façon méthodique, on propose des solutions courtes et simple sans affecter la qualité du produit.

VI.6.1 La méthode simple :

Pour faire face aux demandes du client, tout d'abord on étudie les besoins, puis on procède à l'identification des problèmes. Ensuite on propose des solutions préventives, cette étape est appelée conception fonctionnelle après vient l'étape de la conception détaillée qui consiste à faire les choix des solutions finales puis entamé à la réalisation du produit demandé. [8]

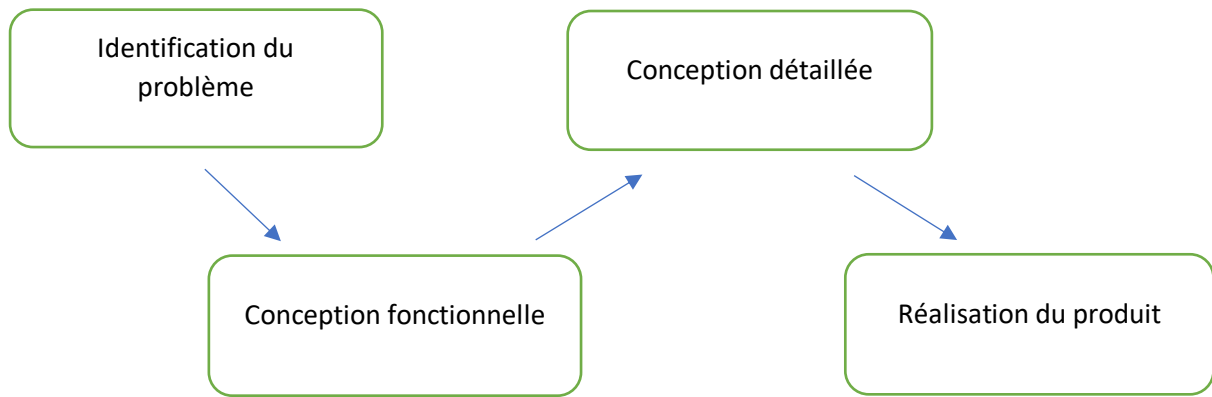


Figure I.3: Méthode simple en conception mécanique.

VI.6.2 La méthode cyclique :

Dans cette méthode, on a la possibilité de modifier des opérations de chaque étape pour évaluer la conception finale par le cycle de développement qui valide les problèmes et les solutions d'après les tests qui sont faits sur la conception (fonctionnelle et détaillée). [6]

VI.6.3 La méthode d'améliorations :

Cette méthode, basée sur un modèle d'amélioration, permet de revoir et d'améliorer les étapes précédentes en boucle. Les données collectées pendant le processus aident à affiner la description du produit. Elle a été appliquée dans la conception d'un système de copilote automatique pour les voitures, offrant ainsi la possibilité d'ajuster et d'améliorer continuellement le produit en se basant sur les retours et les informations recueillis au fur et à mesure de son développement. [8]

VII. Méthodes et outils d'amélioration de la phase d'analyse et de conceptions :

Pour améliorer la phase d'analyse et de conception, plusieurs méthodes et outils sont développés de façon à aider les concepteurs de trouver des meilleures définitions pour le produit.

VII.1 L'intelligence fonctionnelle :

Travail en équipe qui détermine les besoins du client : critères d'appréciation, niveau d'un critère, flexibilité, limite d'acceptation.... Ces fonctions permettent de lier les solutions (comment) aux problèmes (quoi). [6]

VII.2 La méthode de QFD (Quality Function Deployment) :

Est une méthodologie qui vise à identifier les attributs critiques d'un produit pour son objectif principal est de développer ce dernier en répondant aux besoins et aux attentes des clients, tout en intégrant la qualité dès les premières phases de conception.

VII.3 La méthode de SADT (Structured Analysis and Design Technique) :

Est une structure graphique associé à une méthode d'analyse descendante modulaire son objectif est de décomposer un système complexe en éléments plus simples pour faciliter la compréhension et la conception.

Cette structure se décompose en activités et de données :

- L'activité : représente un changement de la connaissance du produit.
- Les données d'entrée : représentent les demandes du marché sous forme d'un cahier des charges.
- Les données de sortie : caractérisent le produit par la connaissance de ses formes, de ses dimensions, des matériaux employés et de son procédé d'élaboration.
- Les données de contrôle : caractérisent les objectifs de performance de l'entreprise qui sont définis au niveau stratégique. [9]

VIII. Types de conception :

Selon les demandes que le concepteur reçoit, il applique différents types de conceptions pour but de satisfaire les besoins des demandeurs.

VIII.1 La conception créative :

C'est la création d'un nouveau produit pour résoudre un problème complexe.

VIII.2 La conception innovante :

Ce type est appliqué sur un produit connu qui présente certaines anomalies à corriger

VIII.3 La conception habituelle :

Appliqué pour prendre des décisions d'ordre technologique, sa concerne juste les Objets techniques. [9]

IX. Le cahier de charge fonctionnel (CDCF) :

IX.1 Définition :

Il est essentiel pour faire une étude, de comprendre ce que veut le client avec précision car les premières idées sont souvent floues et incomplètes. La rédaction d'un document dans lequel le concepteur indique les besoins du client et les contraintes auxquelles il est soumis, ce document est appelé « Cahier de charge fonctionnelles (CDCF) », il permet de réduire le temps de réalisation. [10]

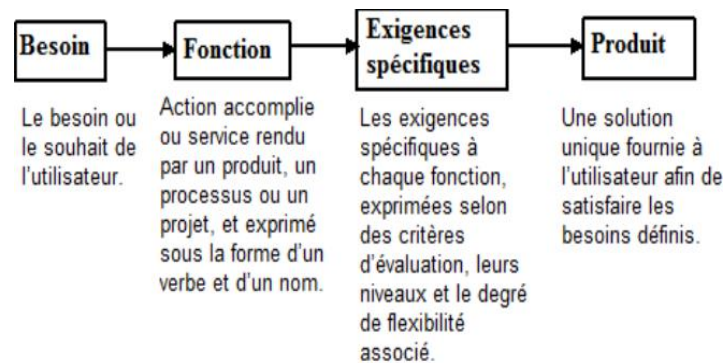


Figure I.4 : cahier de charge fonctionnel

IX.2 Eléments constitutifs d'un CDCF :

IX.2.1 Présentation générale du besoin :

Cette section vise à clarifier de manière approfondie au constructeur ou réalisateur la nature précise du besoin. Elle inclura la présentation du produit et de son marché, le contexte du projet, ainsi que les objectifs et les exigences.

IX.2.2 Expression fonctionnelle du besoin :

Cette partie a objectif de précise les fonctions de service requises avec leurs caractéristiques contraintes, critères d'évaluation et niveaux de flexibilité. La représentation du produit doit être structurée de manière à regrouper logiquement les fonctions.

IX.2.3 Appel à variation :

Une fois que le concepteur-réalisateur a saisi les exigences du client, il est en mesure de formuler des suggestions judicieuses pour enrichir et améliorer l'expression fonctionnelle qui lui a été transmise. En tant qu'expert, il est en position privilégiée pour proposer des idées à la fois novatrices et réalisables.

IX.3 Forme du cahier de charge fonctionnel :

- **Caractéristiques des fonctions** : ajoutées par le concepteur.
- **Le niveau des fonctions** : mentionnées par le concepteur à partir de son savoir sur ces fonctions ou bien des informations données par le client.
- **La flexibilité** : C'est la propriété du client, qui donne une probabilité au concepteur de négocier sur ce qui pose un problème dans le cahier de charge fonctionnel. [6]

IX.4 L'utilisation du cahier de charge :

- Définir les buts et les exigences d'un projet
- Déterminer les besoins d'affaires à développer ou améliorer les processus d'affaires
- Restructurer des organisations
- Définir les exigences des projets réalisés en conception-construction
- Établir les exigences des projets en technologies de l'information
- Rédiger des descriptions de poste.

X. Conception assistée par ordinateur (CAO) :

X.1 Définition :

La conception assistée par ordinateur ou CAO (en anglais, Computer Aided Design ou CAD) comprend l'ensemble des logiciels et des techniques de modélisation géométrique permettant de concevoir, de tester virtuellement – à l'aide d'un ordinateur et des techniques de simulation numérique – et de réaliser des produits manufacturés et les outils pour les fabriquer. [11]

X.2 Objectif de la conception assistée par ordinateur CAO :

De nos jours, la communication occupe une place primordiale dans tous les secteurs, mais elle a toujours été fondamentale pour les techniciens et les ingénieurs. La transmission et la préservation d'idées, de solutions technologiques, ainsi que la représentation de mécanismes, de systèmes ou d'architectures ont toujours exigé l'utilisation de supports graphiques. Les professionnels du domaine utilisent fréquemment des outils graphiques tels que le dessin industriel, la conception assistée par ordinateur (CAO) manuelle ou assistée par ordinateur, pour passer de la phase d'idéation (recherche) à celle de réalisation du produit (fabrication). [12]

X.3 Domaines d'application de la CAO :

De nombreux domaines d'ingénierie font appel à la CAO, nous avons essayé de faire ici un résumé des plus importants domaines d'applications de la CAO pour voir l'ampleur que prend cette dernière, avec ses outils associés (DAO, FAO ...)

- **Acoustique** : Études sur la propagation et réflexion du bruit ...etc.
- **Automatique** : Essentiellement description et simulation des systèmes continus et discrets et de processus.
- **Chimie** : Conception et représentation 3D de grosses molécules comme les protéines.
- **Electronique** : Conception et simulation de circuits intégrés, circuits imprimés, assemblage de cartes électroniques, ...etc.
- **Hydraulique** : Modélisation et calcul des écoulements, pressions (champ scalaire), vitesses (champ vectoriel), ...etc.
- **Mécanique** : La CAO revêt beaucoup de formes dans ce domaine, la conception et le dessin de pièces mécaniques, la modélisation par la méthode des éléments finis, entre autres, pour le calcul de pressions, déplacements, forces ...etc.
- **Mécanique des fluides** : Étude des phénomènes de pollution thermique, ...etc.
- **Thermique** : Étude concernant la diffusion de la chaleur, la modélisation par des méthodes numériques pour le calcul des températures, ...etc.
- **Génie Civil** : Dessin et conception de bâtiments et de constructions diverses, calcul de résistance des matériaux, calcul de structures, ...etc.
- **Génie électrique** : Conception des machines électriques (moteurs, transformateurs, contacteurs, ...), modélisation de phénomènes électromagnétiques (calcul du champ magnétique ou électrique) par des méthodes numériques tels que la méthode des éléments finis, étude des vibrations mécaniques (phénomène couplé en mécanique et en magnétique), simulation et conception des circuits en électronique de puissance, simulation des réseaux électriques, ...etc. [11]

X.4. Avantages et Inconvénients de la CAO :

✓ **Les avantages :**

Les principaux avantages présentés par la CAO :

- Réduire le temps de conception, réduisant ainsi les coûts.
- Boostée la productivité dans l'entreprise.
- Réduire l'erreur humaine lors de la conception.

✓ **Les inconvénients :**

Il y a aussi quelques inconvénients, tel que :

- Coût du matériel.

- Nécessite du personnels qualifier.

A blue graphic element resembling a scroll, with a vertical strip on the left and a horizontal strip on the right, both with rounded ends. The text is centered on the horizontal strip.

Chapitre II :

Analyse de la valeur

L'Analyse de la Valeur (AV) apparaît comme une approche logique, structurée dans laquelle on cherche, avant tout, à concevoir un "produit" parfaitement adapté aux besoins de son utilisateur, et ceci au coût le plus faible. En parlant des besoins de l'utilisateur et non des dispositions qui conviennent en propre, soit au commerçant, soit à l'homme de bureau d'étude, soit au fabricant...Tous ces personnages doivent toujours revenir, lorsque qu'une difficulté apparaît ou qu'un choix est proposé, à l'utilisateur.

Tout cet ensemble permet de poser les problèmes en termes d'objectifs et non en termes de solutions. Cette nouvelle façon d'aborder les problèmes aide à mieux poser les questions, et sur tout à mieux utiliser les compétences, les imaginations.[13]

L'Analyse de la Valeur et l'Analyse Fonctionnelle révèlent ainsi comme des outils de consensus entre les fonctions de l'entreprise ; elles se situent de plus, en interface avec d'autres disciplines utilisées par les entreprises telles que Qualité, Sûreté de Fonctionnement, Gestion de projet, Design, Marketing...

I. Définition :

La méthode de l'analyse de la valeur s'est révélée être un outil précieux pour optimiser l'efficacité et l'efficience dans la gestion de projet.

Elle repose sur l'identification des fonctions clés d'un projet, l'évaluation des coûts associés à ces fonctions, et à l'exploration d'alternatives pour maximiser le rapport coût-efficacité.

Elle offre une perspective unique qui favorise une approche innovante pour résoudre les problèmes, générant des solutions qui apportent une valeur accrue au projet et aux parties prenantes. [13]

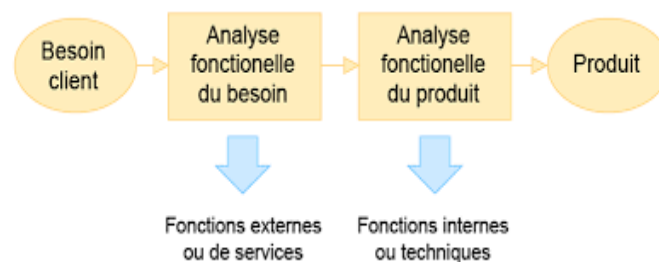


Figure II.1 : L'analyse de la valeur

II. Importance de l'AV dans la conception des systèmes mécaniques :

L'analyse de la valeur d'un projet est un processus fondamental pour plusieurs raisons. Premièrement, elle aide à éviter la mise en œuvre de fonctionnalités superflues qui ne sont pas ou peu utilisées, pouvant conduire à un surcoût du projet, un rejet de la part des utilisateurs ou des difficultés d'adoption de l'outil.

En redéfinissant et en clarifiant les rôles de chaque partie prenante, l'analyse de la valeur favorise l'augmentation de la satisfaction des besoins tout en diminuant le coût du produit.

Cette analyse est donc le rapport entre la fonctionnalité du produit et son coût.

L'importance de cette analyse ne se limite pas à un domaine spécifique, car d'autres secteurs, tels que la gestion des projets informatiques, pourrait bénéficier de sa structure méthodologique.

Il est crucial que tous les participants du projet assument leurs responsabilités. Chaque projet étant unique, il n'y a pas de solution universelle.

Cependant, l'analyse de la valeur fait partie d'une stratégie globale qui peut aider à minimiser les risques d'échec d'un projet.

Même si la gouvernance de projet a tendance à vouloir démarrer et mettre en œuvre des projets rapidement et à moindre coût, il est essentiel de laisser le temps aux opérationnels de comprendre les projets qu'ils doivent gérer.

Il n'est pas nécessaire de bouleverser l'organisation existante, l'analyse de la valeur peut s'adapter à la structure actuelle. [13]

III. Objectifs de l'AV :

L'objectif principal de l'analyse de la valeur dans la conception mécanique est de concevoir un produit qui répond parfaitement aux besoins des utilisateurs, tout en minimisant les coûts de production. Voici les principaux objectifs de l'analyse de la valeur dans la conception mécanique :

1. Satisfaire les besoins des clients : L'analyse de la valeur vise à identifier les fonctions essentielles du produit et à se concentrer sur leur réalisation, en éliminant les fonctions superflues qui n'apportent pas de valeur pour le client.

2. Optimiser les coûts de production : L'objectif est de concevoir le produit au coût le plus faible possible, sans pour autant réduire la qualité ou les services rendus.
3. Favoriser l'innovation : La méthode d'analyse de la valeur encourage la recherche de solutions innovantes pour répondre aux besoins identifiés.
4. S'inscrire dans un modèle économique viable : L'analyse de la valeur s'inscrit dans une démarche globale visant à concevoir un produit rentable et durable pour l'entreprise.

IV. Méthodologie de l'analyse de la valeur :

Les théoriciens de l'Analyse de la Valeur ont mis au point un véritable plan de travail en 7 phases :

1. Orientation de l'action AV
2. Recherche de l'information.
3. Analyse fonctionnelle - Analyse des couts - Validation des besoins et des objectifs.
4. Recherche d'idées et de voies de solution.
5. Etude et évaluation des solutions.
6. Bilan prévisionnel - Présentation des solutions retenues - Décision.
7. Réalisation de la (ou des) solution (s) choisie (s) - Suivi - Bilan définitif

Ce schéma est repris quel que soit l'objet de l'étude.

A chacune de ces étapes vont intervenir l'un (ou plusieurs) des "acteurs" suivants dans des conditions très précises :

- Le décideur
- L'animateur
- Le groupe de travail
- Les services opérationnels

L'Analyse de la Valeur au sein de ce schéma de travail bien spécifique permet de :

- faire appel dans les meilleures conditions aux compétences du personnel de l'entreprise.
- développer au maximum la créativité au sein de groupes ou toute hiérarchie est absente afin de dégager efficacement les solutions adéquates [14].

V. L'analyse fonctionnel :

L'analyse fonctionnelle est une méthode d'ingénierie qui consiste à décomposer un système complexe en sous-systèmes plus simples, en identifiant les fonctions qu'ils remplissent et les relations entre ces fonctions.

V.1. Les types de l'analyse fonctionnel :

- **Analyse fonctionnelle externe** : Lorsque l'analyse fonctionnelle concerne l'usage d'un produit, c'est à dire les fonctions qu'il doit assurer pour satisfaire le besoin du client, le produit peut être considéré comme une boîte noire et seules les fonctions qui « sortent » de la boîte vers l'extérieur sont à prendre en considération.
- **Analyse fonctionnelle interne** : Lorsque l'analyse porte sur le produit lui-même, pour améliorer son comportement, diminuer son coût, améliorer sa fiabilité, il n'est plus considéré comme une boîte noire, mais au contraire l'analyse va porter sur l'intérieur de la boîte pour comprendre ses fonctionnalités internes. Le produit est considéré comme un assemblage de constituants dont chacun remplit certaines fonctions vis-à-vis des autres.

V.2. Les étapes de l'analyse fonctionnelles :

- **Analyse du besoin**

L'analyse du besoin est la première étape de l'analyse fonctionnelle, qui implique de rechercher, de comprendre et d'exprimer le besoin de l'utilisateur. La priorité de l'équipe n'est pas la solution technique, mais plutôt la satisfaction des clients. À ce stade, il est pratique d'utiliser le diagramme bête à cornes : ce support visuel matérialise la manifestation du besoin. Les questions suivantes sont posées par le schéma :

- À qui le produit rend-il service ?

- Sur quoi le produit agit-il ?

- Dans quel but ?

Dans l'exemple de la casquette, le produit rend service à l'utilisateur, en agissant sur le soleil, dans un but de protection.

- **Analyse fonctionnelle du besoin**

L'objectif de cette seconde étape est de repérer et de recenser les différentes fonctions de services du produit, en se situant dans le contexte de son utilisation. L'équipe examine les diverses catégories de fonctions :

- Le besoin est comblé par la fonction principale.
- Les fonctions contraintes sont imposées par les usages et les consignes.
- Les fonctions supplémentaires offrent une flexibilité à l'équipe projet.

À ce stade, l'analyse est souvent structurée par le diagramme pieuvre : le schéma représente les fonctions de services et établit les relations entre le produit et son environnement et les interactions possibles entre les fonctions.

- **Cahier des charges fonctionnel**

Le document de cahier des charges fonctionnel reprend les informations des étapes précédentes afin de les regrouper dans un seul document. À ce stade, on a identifié et recensé les fonctions. Grâce à cette étape, il est possible de les décrire, de les structurer et de les classer.

- Évaluer les fonctions implique de déterminer leurs caractéristiques afin de préparer et de planifier leur mise en œuvre technique.

- En les organisant, on peut les classer par familles afin de bien organiser leur hiérarchisation.

- Les rôles sont classés à des fins stratégiques : l'entreprise les consulte en fonction de leur importance, afin de prendre les décisions opportunes. Afin de classer les différentes fonctions de services, l'équipe projet les met en avant. La priorité des fonctions est en effet influencée par les coûts de développement et le retour sur investissement.

- **Analyse fonctionnelle technique**

La dernière étape consiste à identifier les méthodes techniques et technologiques à utiliser pour élaborer le produit. Il s'agit de s'interroger sur la technique ou la technologie qui permet de concevoir la fonction de service. Dans le cas de la casquette, la visière joue un rôle essentiel en tant que couche d'ombrage, le système d'ajustement joue un rôle contraint en tant qu'ajustement à la taille, tandis que la technologie Gore-Tex joue un rôle anti-transpirant. Les créateurs se basent sur ces données afin d'atteindre le résultat attendu.

Le diagramme FAST est fréquemment utilisé pour illustrer l'analyse fonctionnelle technique, en partant du pourquoi pour aboutir au comment. [15]

VI. Outils et techniques utilisés dans l'AV

L'analyse de la valeur est méthodologie large utilisée dans la conception des systèmes mécaniques pour améliorer la performance réduire les coûts et optimiser la satisfaction des utilisateurs. Dans le cadre de cette méthodologie, plusieurs outils et techniques sont utilisés pour faciliter l'évaluation et la prise de décision, notamment le diagramme FAST, la valeur fonctionnelle et la matrice de décision,

- **Le diagramme FAST** est un outil visuel pour représenter les fonctions d'un système mécanique et leurs relations, facilitant l'identification des contraintes et des opportunités.

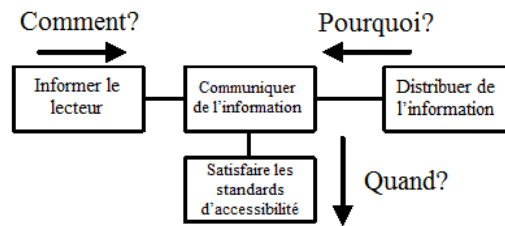


Figure II.2 : La méthode FAST

- **La méthode SADT** est un outil visuel lié à une méthode d'analyse descendante modulaire et hiérarchisée (le mot "Design" se traduit ici par "conception"). Il s'agit d'un modèle (une représentation de la réalité) du système réel. Le produit industriel SADT est soutenu par un logiciel informatique développé par l'entreprise IGL technologie. La "méthode" de modélisation repose sur des concepts fondamentaux tels que : représenter pour comprendre, étayer l'analyse, distinguer le QUOI du COMMENT (rester au niveau fonctionnel), représenter la réalité en la décomposant en sous-ensembles, et formaliser graphiquement dans le but de faciliter la communication entre les différents acteurs impliqués dans la conception ou la maintenance du futur produit. Il existe deux types de modèles de représentation : l'actigramme, qui repose sur les activités, ou le diagramme de l'activité.

ANALYSE FONCTIONNELLE (SADT)

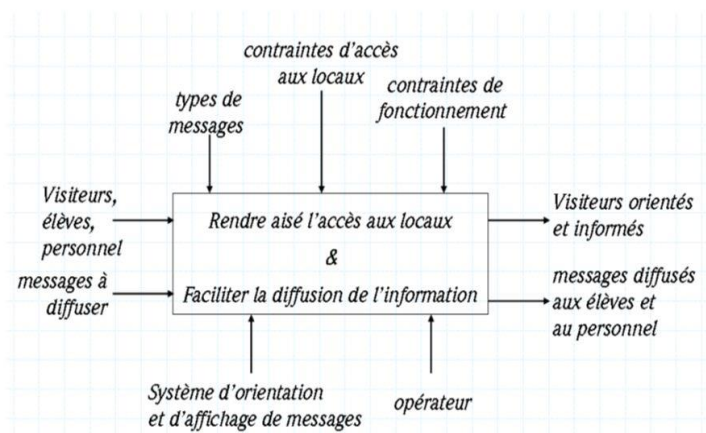


Figure II.3 : La méthode SADT

- **La valeur fonctionnelle** évalue l'importance des fonctions pour optimiser la valeur du système, tandis que la matrice de décision compare les options selon des critères prédéfinis.

Ces outils structurent l'évaluation et aident les concepteurs à optimiser la valeur des systèmes mécaniques, améliorant la performance, réduisant les coûts et satisfaisant les utilisateurs. [16]

VII. Application de l'analyse de la valeur aux systèmes mécaniques :

L'analyse de la valeur appliquée aux systèmes mécaniques suit un processus en plusieurs étapes :

- **Analyse des besoins des utilisateurs et des parties prenantes** : L'importance de l'analyse des besoins dans l'ingénierie systémique

Comprendre précisément ce que veulent les utilisateurs finaux et les parties prenantes est crucial lorsqu'on applique l'analyse de la valeur aux systèmes mécaniques. Ce processus scrute leurs attentes, contraintes et exigences avec acuité. Les données nécessaires sont souvent recueillies par des entrevues, études de marché, sondages ou encore observations directes. Il est aussi essentiel d'équilibrer ces besoins pour éviter les conflits d'intérêts.

En plongeant dans ces analyses détaillées, on peut juger de la faisabilité technique et économique du projet, décrypter les restrictions potentielles et dessiner clairement buts et critères de performance attendus. Introduire ces éléments dès le début du processus de conception écarte risques de retards ou de dépassements budgétaires, tout en épargnant des déceptions futures.

Optimiser un système en se basant sur une approche centrée sur l'utilisateur améliore non seulement sa performance mais aussi sa fiabilité, son efficacité et son expérience globale. En définitive, s'attacher rigoureusement à l'analyse des besoins des utilisateurs ainsi que des parties prenantes forge la pierre angulaire nécessaire au triomphe de toute évaluation dans le domaine mécanique.

- **Identification des fonctions principales du système mécanique** : Comprendre les Principes-clés d'un système mécanique est crucial, notamment dans le contexte de l'analyse de la valeur. Clarifier les fonctions principales aide à préciser objectifs, contraintes, et nécessités fonctionnelles. Les fonctions vitales incluent la transmission de

mouvement et de puissance, le soutien et guidage des parties mobiles, ainsi que le contrôle, la régulation et la sécurité.

La transmission efficace du mouvement est essentielle. Elle requiert un design ingénieux permettant un transfert judicieux des forces nécessaires au bon fonctionnement du mécanisme. Le soutien adéquat assure quant à lui stabilité et durabilité ; grâce à lui chaque composant maintient son intégrité sous stress.

Le rôle du contrôle est tout aussi primordial : surveiller continuellement les valeurs clés pour une action corrective immédiate garantit une opération sans faille. Quant à elle, la sécurité empêche incidents ou pannes par le déploiement astucieux de mécanismes protecteurs.

Identifiant ces fonctions cardinales permet donc une focalisation ciblée durant la conception. Ce processus aligne étroitement création technique avec attentes spécifiques - augmentant ainsi performances tout en réduisant coûts superflus. Ainsi armés d'une compréhension profonde des besoins fondamentaux des systèmes qu'ils créent, les ingénieurs peuvent maximiser l'utilité répondant précisément aux exigences pratiques des utilisateurs.

- **Analyse des solutions existantes et des alternatives potentielles**

L'analyse de la valeur appliquée aux systèmes mécaniques est une démarche rigoureuse et enrichissante. Elle commence par un examen minutieux des solutions actuelles, révélant les forces et faiblesses du système en place. Ce regard critique permet de comprendre en profondeur les caractéristiques et performances existantes.

La quête de solutions novatrices ouvre la porte à l'exploration de technologies émergentes, de matériaux avant-gardistes, et d'idées transformant radicalement la manière dont les choses fonctionnent. Cet examen s'étend à divers critères tels que l'efficacité, la sécurité, la durabilité, mais aussi des aspects cruciaux comme le coût initial et d'entretien, ainsi que l'impact environnemental.

L'enjeu est majeur : trouver des alternatives qui surpassent le statu quo tout en minimisant les dépenses et simplifiant les processus. Il s'agit donc d'un voyage vers une optimisation où chaque découverte peut potentiellement augmenter la valeur globale du système.

Cette méthode continue elle-même à guider toute décision ultérieure visant à peaufiner ou repenser complètement certains éléments mécaniques pour maximiser leur efficacité tout en respectant strictement les contraintes pratiques ou économiques définies dès le départ.[17]

- **Évaluation des coûts et des bénéfices associés à chaque alternative :**

L'évaluation de la valeur dans les systèmes mécaniques implique un examen approfondi des coûts et des bénéfices associés à chaque option de conception. Cette analyse est essentielle pour mesurer, comparer et quantifier les avantages et inconvénients propres à chaque solution envisagée. L'examen des coûts couvre toutes les dépenses nécessaires, incluant la fabrication, l'exploitation et la maintenance, tout en prenant en compte les coûts relatifs à chaque étape du cycle de vie du système.

Simultanément, l'évaluation des bénéfices se concentre sur les gains potentiels offerts par chacune des solutions, englobant notamment l'amélioration des performances techniques, la durabilité accrue et le niveau élevé de satisfaction client. Ces avantages peuvent être chiffrés ou appréciés de manière qualitative.

Le comparatif entre coûts et bénéfices permet d'identifier la solution ayant le meilleur rapport qualité-prix. Pour cela, l'analyse multicritère ainsi que d'autres méthodologies d'évaluation sont employées afin de juger objectivement les différentes alternatives. Ce processus décisionnel aide non seulement à sélectionner l'option idéale selon les contraintes techniques et objectifs projetés mais favorise également la création de systèmes efficaces qui répondent précisément aux attentes utilisateur.

En outre, cette démarche offre une perspective comparative entre plusieurs choix possibles en mettant en exergue leur potentiel respectif. Cela indique clairement quels aspects peuvent être optimisés ou innovants pour chacune des propositions analysées. [17]

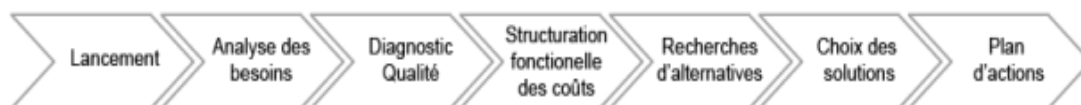


Figure II.4 : Acteur du schéma AV

VIII. Optimisation et mise en œuvre des solutions :

- **Sélection de la solution optimale en fonction des critères prédéfinis :**

Il est essentiel de choisir la solution la plus appropriée lors de la conception des systèmes mécaniques. Dans cette étape, il est nécessaire d'évaluer diverses options pour sélectionner celle

qui correspond le mieux aux critères spécifiques établis. Ces critères préétablis incluent des éléments tels que les dépenses, les résultats, la durabilité, et bien d'autres encore. En analysant ces critères de manière approfondie, on évalue les différentes options. On peut utiliser différentes méthodes d'analyse, comme l'analyse coût-avantage, l'analyse multi-attributs et l'analyse de la valeur. Les contraintes et les objectifs du projet sont pris en compte lors de la sélection de la solution optimale. Les contraintes peuvent englober des limites financières, des délais limités, des spécifications techniques, et ainsi de suite. En ce qui concerne les objectifs, ils ont pour but d'atteindre des résultats précis. [17]

- **Intégration des résultats de l'AV dans le processus de conception mécanique :**

Dans la conception des systèmes mécaniques, l'Analyse de la Valeur (AV) joue un rôle essentiel en maximisant la valeur ajoutée du produit. Il est nécessaire de prendre en compte les fonctions essentielles du produit, d'évaluer leur importance relative et de trouver des solutions alternatives afin de répondre de manière optimale à ces fonctions. Dès les premières étapes de la conception, l'analyse visuelle est intégrée pour analyser le produit en fonctions principales et secondaires. Cela permet d'évaluer l'importance relative de chaque fonction en utilisant des outils tels que l'Analyse Fonctionnelle ou la Matrice d'Eisenhower. L'AV cherche à optimiser la valeur ajoutée en encourageant la création et l'évaluation d'alternatives de conception en prenant en considération des critères tels que les dépenses, les performances et la faisabilité. Cette méthode incite à une réflexion créative et méthodique, ce qui diminue les risques. [18]

- **Gestion des risques et des contraintes lors de la mise en œuvre des solutions optimisées :**

Il est essentiel de prendre en compte les risques et les contraintes lors de la conception des systèmes mécaniques optimisés. Avant de mettre en place les solutions, il est primordial d'examiner de manière approfondie les risques potentiels ainsi que les contraintes techniques, économiques et des opérations. Cette étape offre la possibilité de repérer et d'évaluer les risques pour les classer et mettre en œuvre des mesures d'atténuation adéquates. Il est également important de prendre en compte les contraintes liées à la mise en place, comme les réglementations et les contraintes budgétaires. La mise en place de stratégies d'atténuation et de contournement revêt une importance capitale afin de réduire les risques et assurer la valeur ajoutée des solutions proposées. En évitant les risques et les contraintes, la gestion efficace des

risques et des contraintes permet d'améliorer l'efficacité et les performances des systèmes mécaniques.

IX. Études de cas et exemples concrets :

- **Présentation d'exemples réels où l'AV a été appliquée avec succès dans la conception de systèmes mécaniques :**

La méthode de gestion de projet appelée Analyse de la Valeur (AV) vise à maximiser la valeur d'un produit ou d'un système en repérant et en supprimant les dépenses superflues ainsi que les caractéristiques superflues. La conception des systèmes mécaniques est souvent basée sur cette approche afin d'améliorer leur efficacité et leur fonctionnalité. Toyota, Tesla Motors, Airbus et Caterpillar sont des entreprises renommées qui ont incorporé l'AV dans leurs processus de conception afin d'obtenir des résultats importants. Dans son système de production Lean, Toyota a employé l'AV afin de diminuer les dépenses et d'améliorer la qualité de ses véhicules. La société Tesla Motors a utilisé l'intelligence artificielle dans la conception de ses véhicules électriques afin d'améliorer le système de batteries, diminuer les dépenses et optimiser les performances. Airbus possède également. [18]

X. Conclusion

Ce chapitre examine l'analyse de la valeur, une méthodologie destinée à maximiser la valeur d'un produit ou d'un processus tout en minimisant les coûts, en particulier dans la conception des systèmes mécaniques. Il aborde plusieurs points essentiels, notamment la définition de la valeur, qui est perçue comme la fonction d'un produit divisée par son coût, soulignant ainsi l'importance de comprendre les besoins des clients et les contraintes budgétaires. La méthode d'analyse de la valeur comprend des étapes clés telles que l'identification des fonctions, l'évaluation de leur importance et la génération de solutions alternatives. Parmi les outils et techniques présentés, on trouve la matrice des fonctions de la valeur et la matrice des coûts, qui permettent de hiérarchiser les fonctions selon leur importance et de quantifier les coûts associés. D'autres techniques, comme l'analyse de la valeur fonctionnelle et l'analyse basée sur les caractéristiques, aident à établir les relations entre les fonctions et les caractéristiques d'un système mécanique. Le chapitre souligne également certains défis et limites, notamment l'importance de bien définir les objectifs et contraintes dès le début pour éviter des révisions coûteuses, ainsi que les complications liées à la complexité des systèmes mécaniques et aux problèmes de communication entre parties prenantes. En résumé, ce chapitre offre une compréhension approfondie de l'analyse de la valeur, de ses outils et des défis associés à son

application dans la conception des systèmes mécaniques. En intégrant ces connaissances, les professionnels peuvent optimiser les performances tout en réduisant les coûts, renforçant ainsi leur compétitivité et leur satisfaction client.



Chapitre III :
Frittage

I. INTRODUCTION

La science du frittage n'est pas une science nouvelle, bien au contraire, la technique de frittage est très ancienne puisqu'elle précède les procédés de métallurgie classique : les Égyptiens l'utilisaient déjà pour la fabrication d'instruments, 3 000 ans avant notre ère. Par contre, elles ne sont vraiment développées qu'au XX^{ème} siècle. En effet, depuis l'apparition de la science des céramiques, on observe de nombreuses innovations aussi bien dans le domaine des procédés que dans celui des compositions qui permet alors de nouvelles utilisations de la céramique.

Le phénomène de frittage peut se définir comme « la manière de traitement thermique, avec ou sans application de pressions extérieures, au moyen duquel un système de particules individuelles ou un corps poreux modifie quelques-unes de ses propriétés dans le sens de l'évolution vers un état de compacité maximale, c'est à dire vers un état de porosité nulle ».

Le frittage permet donc, par l'utilisation de fours à haute température, de consolider le matériau après les étapes de mise en forme et de consolidation de la pâte qui représentent les différents stades d'élaboration d'une céramique.

II. Définition du frittage.

Il est difficile de donner une définition universelle du frittage, mais parmi celles qui sont largement reconnues et acceptées par la communauté scientifique, il y a la définition proposée par G. Cizeron : "Le frittage est un processus thermique qui transforme un système composé de particules individuelles (ou d'un aggloméré poreux) en l'absence ou en présence d'une pression externe, de manière à modifier au moins certaines propriétés du système (voire toutes) en réduisant l'énergie libre globale.

Ce processus entraîne également une diminution significative (voire complète) de la porosité initiale. De plus, il suppose la présence continue d'une phase solide pendant tout le traitement thermique afin de maintenir la forme et les dimensions du système considéré. [19]

III. Les stades du frittage

La réduction de l'énergie inter faciale durant le frittage est liée à la croissance de joints inter particulaires conduisant ainsi vers l'équilibre thermodynamique. Ceci entraîne une évolution microstructurale. Selon la forme de la porosité, le frittage a été divisé en trois stades : lorsque la poudre a subi une compaction avant le frittage, tous les stades de frittage n'apparaissent pas forcément. Dans les cas étudiés durant ce travail, à l'état initial les particules sont non déformées

et les contacts sont ponctuels, donc les trois stades du frittage montrés sur la figure III.1, sont présents.

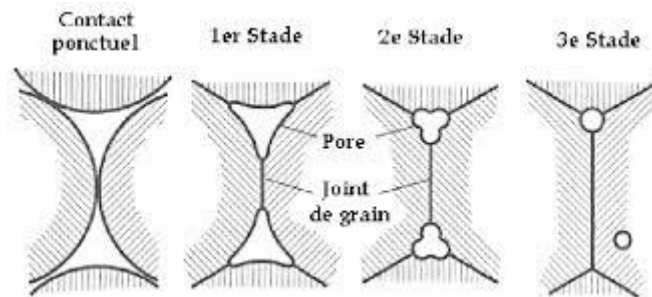


Figure III.1 : Évolution de la forme du pore durant le frittage et schématisation des 3 stades de frittage.

Le premier stade du frittage correspond à la formation et la croissance des cous entre les particules. Au cours du deuxième stade il existe un réseau de pores interconnectés de forme à peu près cylindrique dont le volume se réduit progressivement. Finalement, durant le troisième stade, les pores sphériques et isolés sont éliminés.

1^{er} stade du frittage

Le premier stade du frittage est normalement achevé durant la période de chauffage, avant d'atteindre la température du palier de frittage. Pendant ce stade, se créent les premiers contacts entre les particules (à noter que quelques auteurs considèrent une étape d'adhésion préliminaire au premier stade) et les cous commencent à croître. La croissance des cous interparticulaires entraîne une réduction de l'énergie interfaciale de plus de 50 % et une faible densification. La fin du premier stade se produit quand le rapport du rayon de contact au rayon de particule vaut environ 0.3 pour des particules de même taille. Mais elle pourrait aussi être déterminée par d'autres paramètres comme le retrait, l'aire de la surface libre des particules ou la densité.

2^{ème} stade du frittage Le deuxième stade de frittage est particulièrement associé à la densification du compact et s'accompagne d'un grossissement de grains et de l'arrondissement de pores. Les pores quasi cylindriques forment un réseau interconnecté. À la fin du 2^{ème} stade, les pores deviennent sphériques et sont principalement situés en périphérie des joints de grains, et l'élimination de petits grains entraîne une coalescence de pores attachés aux coins des joints de grains, au fur et à mesure que la densification du compact progresse. Les gros pores croissent aux dépens des plus petits, en utilisant les joints de grains comme trajectoires de transport.

3^{ème} stade du frittage

Le troisième stade du frittage commence quand les pores se ferment, approximativement à 8% de porosité. Les pores continuent à se combler par transport de matière, soit depuis les joints de grains, soit depuis le cœur des grains. Le troisième stade est relativement lent comparé aux stades précédents. Le grossissement de grains se déroule par migration de joints de grains. Durant ce stade du frittage il peut se produire un phénomène de séparation entre les pores et les joints de grains. Pendant la croissance de grains, un pore attaché à un joint de grain peut ralentir le déplacement du joint quand il est moins mobile que le joint. Ce joint se courbe alors, jusqu'à une situation critique où le pore se sépare du joint de grain, comme on le montre sur la figure III.2 L'élimination ultérieure de ce pore au milieu d'un grain, qui peut se faire seulement par diffusion en volume, est généralement très difficile [20]

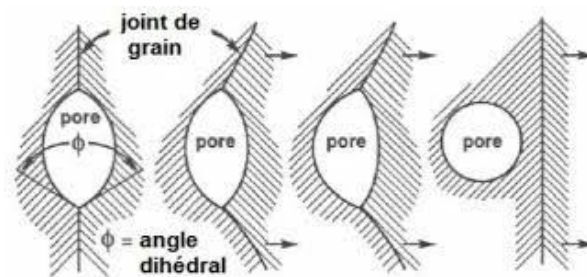


Figure III.2 : Séquence de la séparation du pore et de joint de grain, durant le stade final du frittage.

IV. Différents types de frittage

Le frittage englobe diverses techniques classées en fonction des mécanismes et des conditions impliqués dans le processus. Comprendre les différents types de frittage est crucial pour sélectionner la méthode appropriée pour des applications spécifiques. Voici quelques types courants de frittage :

IV.1. Frittage à l'état solide

Le frittage à l'état solide, également connu sous le nom de liaison par diffusion, est une méthode de frittage largement utilisée. Dans ce processus, les matériaux en poudre sont soumis à des températures élevées en dessous de leur point de fusion. À mesure que la température augmente, une diffusion atomique se produit entre les particules adjacentes, facilitant la formation de collets et de liaisons. L'élimination des vides et le réarrangement des particules conduisent à une densification et à la formation d'un massif.

Le frittage à l'état solide est couramment utilisé dans la production de céramiques, telles que la porcelaine et l'alumine, ainsi que dans le frittage de poudres métalliques. Il est privilégié

lorsque la préservation de la composition chimique et la pureté du matériau sont cruciales. En contrôlant soigneusement les paramètres de frittage, tels que la température, la durée et la pression, les propriétés souhaitées du matériau peuvent être obtenues.

IV.2. Frittage en phase liquide

Le frittage en phase liquide implique l'ajout d'une phase liquide pour faciliter le réarrangement et la liaison des particules pendant le processus de frittage. La phase liquide, souvent un matériau à bas point de fusion, agit comme un liant ou un fondant, réduisant ainsi la température de frittage nécessaire à la densification. Cette méthode est particulièrement utile lors du frittage de matériaux à points de fusion élevés ou lorsqu'une augmentation du taux de densification est souhaitée.

Lors du frittage en phase liquide, la phase liquide se propage entre les particules, favorisant le réarrangement des particules et améliorant la formation et la densification du col. La présence de la phase liquide permet également l'élimination des impuretés et facilite le frittage de matériaux aux compositions complexes.

Le frittage en phase liquide est couramment utilisé dans la production de carbures cémentés, où les particules de carbure de tungstène sont liées à l'aide d'un liant à base de cobalt. Il est également utilisé dans le frittage de certaines céramiques et alliages métalliques, comme l'acier inoxydable.

IV.3. Frittage activé

Le frittage activé, également connu sous le nom de frittage assisté par champ ou frittage par plasma d'étincelle, est une technique de frittage innovante qui utilise des sources d'énergie externes pour favoriser la densification. Cela implique l'application d'un champ électrique, d'un courant électrique ou d'un rayonnement électromagnétique pour améliorer le processus de frittage.

La source d'énergie externe accélère la diffusion atomique, conduisant à une formation et une densification rapides du col. L'application d'énergie électrique génère un échauffement localisé, réduisant le temps de frittage et permettant le frittage des matériaux à des températures plus basses.

Cette technique offre des avantages tels qu'une densification améliorée, une croissance réduite des grains et un contrôle amélioré de la microstructure et des propriétés.

Le frittage activé trouve des applications dans divers domaines, notamment la production de céramiques avancées, de matériaux fonctionnels et de composites. Il est particulièrement avantageux pour les matériaux présentant des points de fusion élevés, des compositions complexes ou une capacité de frittage limitée [21].

V. Applications du frittage

Le frittage trouve de nombreuses applications dans diverses industries en raison de sa capacité à transformer des matériaux en poudre en composants solides aux propriétés améliorées. Explorons quelques-uns des domaines clés dans lesquels le frittage est largement utilisé :

V.1. Céramique

La céramique est l'un des principaux domaines où le frittage est largement utilisé. Les céramiques frittées présentent une résistance mécanique, une dureté et une stabilité thermique améliorées. Le frittage est utilisé dans la production de carreaux de céramique, d'articles sanitaires, d'outils de coupe, de matériaux réfractaires et d'isolateurs électriques. En contrôlant soigneusement les paramètres de frittage, les matériaux céramiques peuvent atteindre la densité, la porosité et la microstructure souhaitées pour des applications spécifiques.

V.2. Métallurgie

Dans les applications métallurgiques, le frittage est utilisé pour fabriquer une large gamme de composants métalliques. Cela comprend les engrenages, les roulements, les bagues, les pièces automobiles et les composants structurels. Les poudres métalliques, telles que le fer, l'aluminium et l'acier inoxydable, sont compactées et frittées pour produire des pièces solides dotées d'excellentes propriétés mécaniques. Les composants métalliques frittés présentent souvent une résistance, une résistance à l'usure et une précision dimensionnelle supérieures à celles des pièces moulées traditionnelles.

V.3. Composites

Le frittage joue un rôle essentiel dans la production de matériaux composites, dans lesquels deux ou plusieurs matériaux distincts sont combinés pour créer des matériaux aux propriétés améliorées. Dans la fabrication de composites à matrice métallique (MMC) et de composites à matrice céramique (CMC), le frittage est utilisé pour lier les matériaux de renforcement, tels

que des fibres ou des particules, avec le matériau de matrice. Cela améliore la résistance, la rigidité et la ténacité du matériau composite obtenu.

V.4. Métallurgie des poudres

La métallurgie des poudres, branche spécialisée de la métallurgie, s'appuie largement sur le frittage. Il s'agit de la production de composants métalliques à partir de poudres métalliques. Grâce à des processus tels que le compactage et le frittage, des pièces complexes aux formes complexes peuvent être fabriquées. La métallurgie des poudres est couramment utilisée dans l'industrie automobile pour la production d'engrenages, d'arbres à cames et de sièges de soupapes, ainsi que dans la fabrication d'outils de coupe et de filtres frittés.

V.5. Impression 3D/Fabrication Additive

Le frittage joue un rôle crucial dans les techniques de fabrication additive telles que le frittage sélectif par laser (SLS) et le frittage par faisceau d'électrons (EBS). Dans ces processus, les matériaux en poudre sont frittés sélectivement couche par couche, sur la base de conceptions numériques, pour créer des objets tridimensionnels complexes. Le frittage permet la consolidation et la liaison du matériau en poudre, ce qui donne lieu à des pièces entièrement denses et fonctionnelles. Cette technologie est utilisée dans diverses industries, notamment l'aérospatiale, la santé et le prototypage.

V.6. Électronique et génie électrique

Le frittage est utilisé dans la production de composants électroniques et électriques. Dans la fabrication de céramiques électroniques, telles que des condensateurs, des varistances et des thermistances, le frittage est utilisé pour lier les particules de céramique, créant ainsi des matériaux denses et électriquement conducteurs. Le frittage est également utilisé dans la fabrication de contacts électriques, de boîtiers de semi-conducteurs et de composants de circuits imprimés.

Ce ne sont là que quelques exemples des diverses applications du frittage. Le processus est continuellement exploré et affiné pour répondre aux besoins changeants de différentes industries, permettant la production de matériaux et de composants hautes performances.

VI. Types des fours de frittage :

Les fours de frittage sont des équipements essentiels dans la fabrication de matériaux céramiques, métalliques et composites. Ils permettent de chauffer des matériaux à des

températures élevées pour favoriser la fusion et l'agglomération des particules. Voici un aperçu des principaux types de fours de frittage :

VI.1. Fours à atmosphères

- **Fours de frittage à atmosphère ordinaire** : Ils fonctionnent dans un environnement atmosphérique standard. Ils conviennent aux matériaux qui ne nécessitent pas d'atmosphère contrôlée.
- **Fours sous atmosphère contrôlée** : Utilisent des gaz comme l'azote ou l'argon pour créer une atmosphère spécifique, idéale pour les matériaux sensibles à l'oxydation.

VI.2. Fours sous vide

- **Fours de frittage sous vide** : Ces fours fonctionnent dans un environnement sous vide. Ils sont idéaux pour les matériaux de haute température et de haute pureté. Les conditions de vide empêchent l'oxydation et d'autres réactions atmosphériques, ce qui améliore la pureté et la qualité du produit fritté.

VI.3. Structure du Four

- **Fours verticaux** : Conçus pour un chargement vertical, facilitent le processus où la gravité joue un rôle.
- **Fours horizontaux** : Offrent un accès facile pour le chargement et le déchargement, adaptés aux articles plus volumineux

VI.4. Technologies Avancées


- **Fours à micro-ondes** : Utilisent des micro-ondes pour un chauffage rapide et uniforme, optimisés pour les processus nécessitant une vitesse élevée.
- **Fours à pression à chaud** : Appliquent une pression pendant le frittage, idéaux pour les matériaux complexes et poreux [22]

VII. CONCLUSION

Le frittage est un procédé de fabrication essentiel dans diverses industries, permettant de transformer des poudres métalliques ou céramiques en objets solides. Ce processus consiste à chauffer les particules de poudre juste en dessous de leur point de fusion, ce qui entraîne leur fusion et la formation d'un matériau cohésif. Bien que le frittage soit capable de produire des pièces complexes avec d'excellentes propriétés mécaniques, il peut également entraîner une diminution de la densité des produits finis. Malgré cette contrainte, il est largement utilisé dans des secteurs tels que l'automobile, la médecine, l'aérospatiale et l'électronique. Les avancées dans les matériaux et les techniques de frittage continuent d'améliorer la qualité des pièces produites, ouvrant ainsi de nouvelles opportunités dans le domaine industriel.

2^{ème} partie :

**Conception et réalisation
du four**

A blue scroll graphic with a white text box in the center. The scroll is unrolled, showing a white rectangular area with rounded corners. The text is centered within this area.

Chapitre IV : conception et réalisation du prototype

Chier de charge :

- Le four doit pouvoir assurer un fonctionnement sous vide et sous une atmosphère contrôlée.
- Atteindre et maintenir les températures requises de manière stable et précise
- Le four doit pouvoir assurer des cycles de température dont le palier peut atteindre 1500°C (les résistances mises à notre disposition pouvant atteindre 1800°C)
- La manipulation du four doit être sans risques.

I. Introduction :

Le four de frittage est un équipement essentiel dans l'industrie manufacturière moderne, particulièrement dans le domaine de la métallurgie, de la céramique, de la fabrication de poudres spécifiques (enrobées). Ce dispositif de traitement thermique joue un rôle crucial dans la transformation de matériaux en poudre en pièces solides et durables, en les exposant à des températures élevées sans atteindre leur point de fusion. Le processus de frittage permet de créer des objets complexes, précis et résistants, ce qui en fait une technologie incontournable pour de nombreuses applications industrielles, allant de l'aérospatiale à la médecine, en passant par l'automobile et l'électronique.

II. Fonctionnement du four

Les fours de frittage sous atmosphère contrôlée sont des équipements sophistiqués utilisés pour traiter divers matériaux, tels que les céramiques, les métaux et les poudres, dans des conditions spécifiques d'atmosphère pour obtenir des propriétés désirées.

Les fours de frittage sous atmosphère contrôlée permettent d'obtenir des matériaux de haute qualité avec des propriétés spécifiques en contrôlant de manière précise les conditions environnementales tout au long du processus. Ces étapes peuvent varier en fonction du matériau, de la taille des pièces et des spécifications du processus.

Voici les étapes générales d'utilisation d'un four de frittage sous atmosphère contrôlée :

1. Préparation du four :

- s'assurer que le four est propre et exempt de tout résidu précédent qui pourrait contaminer le processus.
- Vérifier le fonctionnement des systèmes de contrôle de la température, de la pression et de la composition de l'atmosphère.
- Charger les pièces à fritter sur des plateaux ou dans des supports appropriés, en veillant à maintenir une certaine distance entre elles pour éviter la fusion ou la déformation due au contact.

2. Réglage des paramètres :

- Programmer les paramètres de température, de pression et de composition de l'atmosphère selon les spécifications du matériau à fritter et des propriétés souhaitées.
- Certains fours de frittage offrent des courbes de frittage personnalisées, permettant de contrôler avec précision la montée en température, les paliers de maintien et le refroidissement.

3. Mise sous atmosphère contrôlée :

- Purger l'enceinte du four avec un gaz inerte ou un mélange de gaz approprié pour éliminer l'oxygène et d'autres contaminants de l'atmosphère.
- Établir la pression atmosphérique souhaitée dans le four, généralement en utilisant de l'argon, de l'azote ou autres gaz adaptés au tube utilisé et à la tuyauterie installée.

4. Montée en température :

- Augmenter progressivement la température conformément au programme de frittage.
- Surveiller en permanence la température à l'intérieur du four pour garantir un chauffage uniforme.

5. Paliers de maintien :

- À des températures spécifiques, maintenir le four à une température constante pendant une durée déterminée. Ces paliers permettent la diffusion des particules et la consolidation du matériau.

6. Refroidissement contrôlé :

- Réduire progressivement la température pour éviter les chocs thermiques et les déformations excessives des pièces.
- Certains matériaux, comme les céramiques, peuvent nécessiter un refroidissement très lent pour éviter les fissures.

7. Évacuation de l'atmosphère contrôlée :

- Lorsque le processus de frittage est terminé, évacuer lentement et en toute sécurité l'atmosphère contrôlée du four pour éviter tout accident.

8. Retrait des pièces :

- Attendre que le four refroidisse à une température sécuritaire avant de retirer les pièces frittées.

III. Description du four :

Le four est composé d'un tube en céramique (1) de forme cylindrique destinée à recevoir les échantillons à fritter avec des pièces usinées en inox (2) qui sont collées sur les extrémités, dans une extrémité on trouve une pièce qui est utilisée comme emplacement du thermocouple (3), la fixation se fait avec un collier de serrage (4) l'étanchéité est assurée avec une bague (5) et un

joint torique, l'autre côté sert comme ouverture d'insertion des échantillons destinés au frittage ainsi que la fixation du système de détection du vide. Sur les deux extrémités on a une vis de raccordement (6) pour le pompage du vide ou l'injection du gaz, l'ensemble des éléments précédents sont fixés sur un boîtier à l'aide des supports en aluminium (7). Le chauffage du four est obtenu à l'aide de trois résistances en carbure de silicium (8) qui sont fixées sur une plaque réfractaire en laine d'alumine compactée (9). L'isolation est assurée par de la laine d'alumine compactée (10) et retenue dans un volume hexagonal limité par deux tôles en inox (11). Tous ces éléments sont les constitutifs du corps du four ; ce dernier est maintenu suspendu sur un boîtier à l'aide de tiges filetées (12). Le boîtier (13) contient tous les éléments nécessaires pour la commande et la régulation du four (régulateurs de température, jauge de vide, interrupteurs, circuit électrique et conduits de gaz). L'ensemble est placé sur une table métallique (14) qui accueille, en son milieu, le transformateur de courant et les pompes à vide.

Le four est équipé d'un système de régulation pour le contrôle de la température, de la vitesse de chauffe et des paliers de maintien en température.

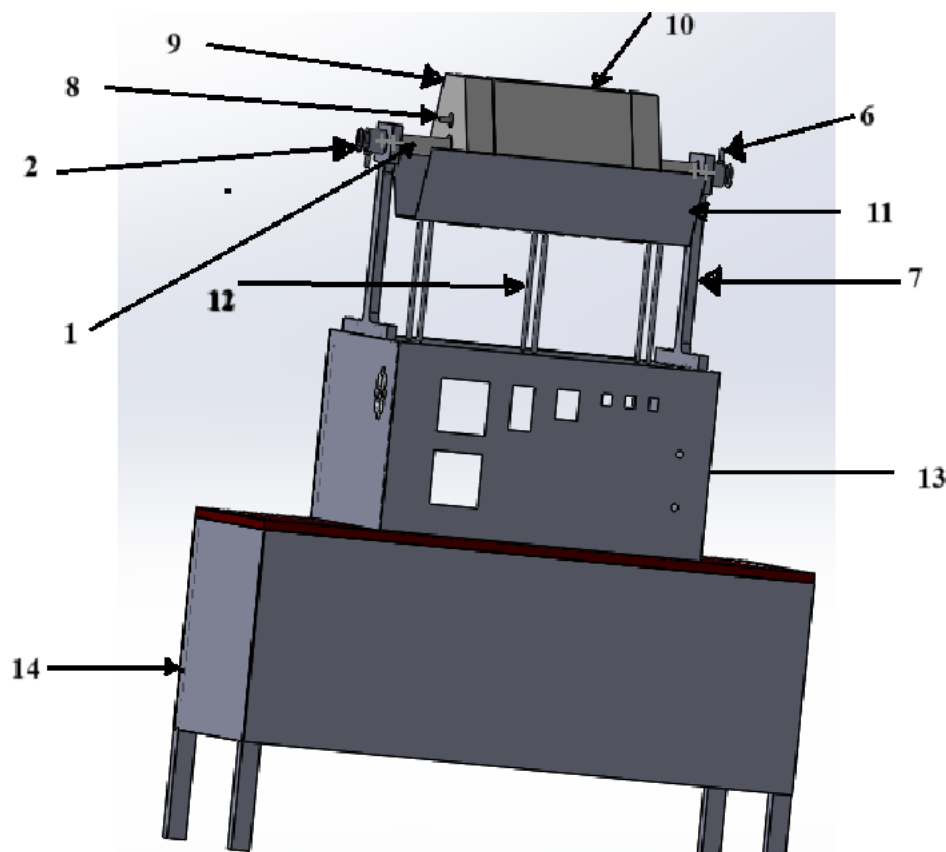


Figure IV.1 : vue d'ensemble des composants

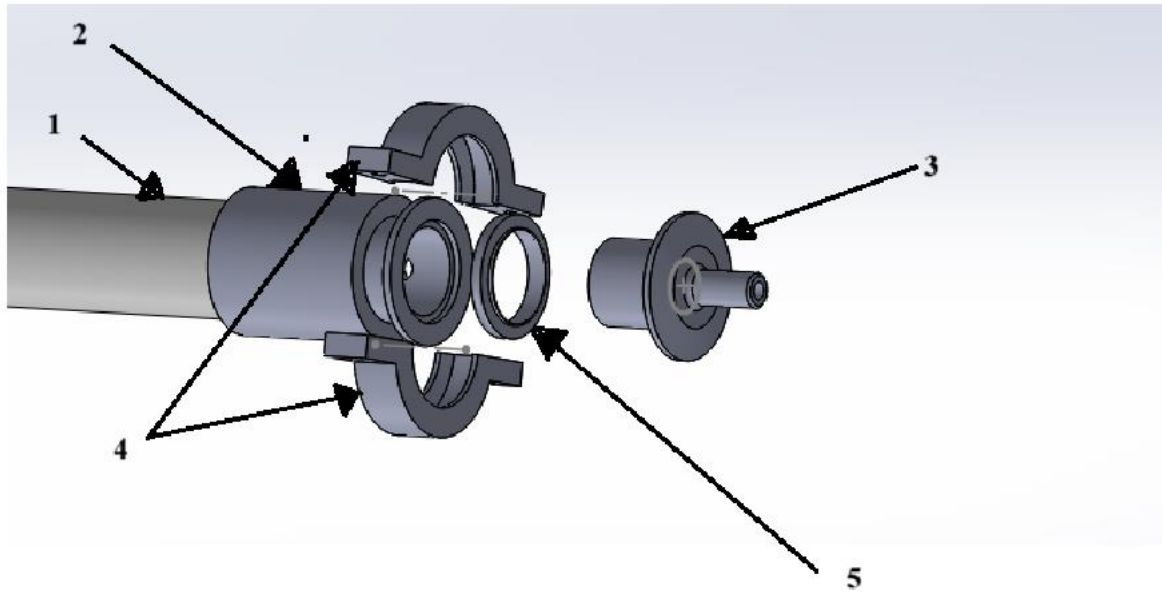


Figure IV.2 : Les différents composants de l'extrémité du tube

Seules certaines pièces du four sont conçues et fabriquées par nos soins. Les autres sont soit achetées, soit récupérées et certaines sont disponibles. Nous avons conçu et fabriqué :

1. Table du four
2. Boitier de commande
3. Corps du four
4. Façonné les matériaux d'isolation thermique
5. Les supports
6. Les extrémités du tube
7. Les colliers de serrage
8. Eléments de gestion et de contrôle de l'atmosphère de frittage

IV. Présentation des éléments constitutifs

IV.1 La table du four :

La table réalisée par soudage et assemblage de tôles. Elle doit pouvoir supporter le four et accueillir tous les accessoires du four tels que le transformateur, la pompe a vide, le bac d'eau de refroidissement. Elle peut aussi posséder des espaces de rangements. Elle doit assurer la stabilité du four, la sécurité de l'opérateur et résister aux différentes sollicitations mécaniques et thermiques auxquelles elle est soumise. En plus de ces exigences techniques elle doit présenter une esthétique agréable.

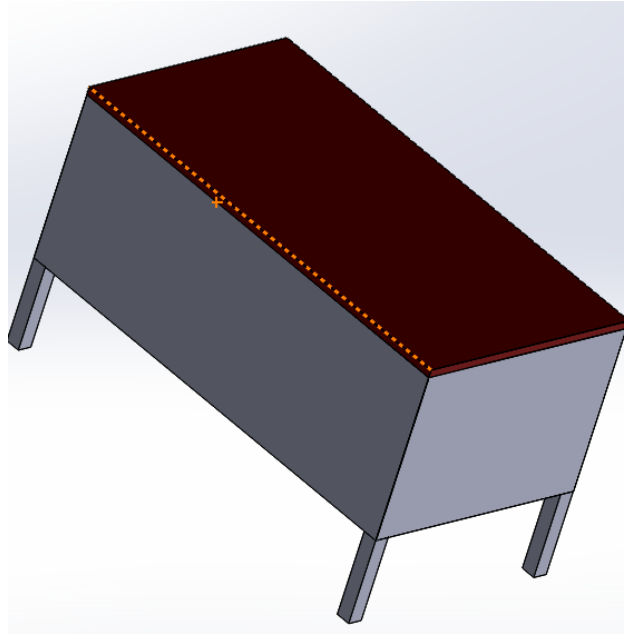


Figure IV.3 : la table du four

IV.2 Le boîtier de commande :

Le boîtier de forme rectangulaire dimensionné de 700x400x630mm réalisé par mécano-soudé d'un cadre et tube métallique sur lequel des tôles de chaque côté sont vissées.

Il est destiné à recevoir tous les éléments nécessaires pour la gestion de notre dispositif

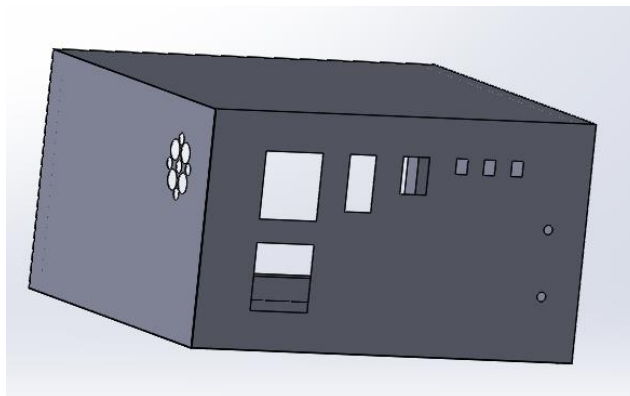


Figure IV.4 : le boîtier de la commande.

- a) Partie de face (Tableaux de bord) : cette partie est fabriquée en tôle en acier, elle est démontable pour permettre l'accès en cas de maintenance nécessaire.

Sur cette partie on trouve les deux jauges de vide primaire et vide secondaire, 3 interrupteurs, un interrupteur principal, des robinets de gestion de l'atmosphère, deux régulateurs de

température de type Eurotherm 2408 et 2116i, le débitmètre et un voyant indique l'actionnement des résistances.



Figure IV.5 : Vue de face.

- b) Partie de gauche et droit : on trouve les trous destinés pour l'emplacement des ventilateurs qui garantit le refroidissement des composants électrique, ainsi que la sortie des fils de thermocouple et celui de jauge de vide



Figure IV.6 : Vue de droite.

- c) Partie de derrière : se trouve l'ensemble de la tuyauterie du système du gaz, un fil électrique 220 V pour l'alimentation des composant du boitier, un autre fil pour l'alimentation de la pompe à vide et un disjoncteur principal du courant.



Figure IV.7 : vue de derrière.

IV.3 Le corps du four :

C'est la partie chaude de notre four, elle est de forme hexagonale réalisée avec deux tôles en inox fixées ensemble avec 8 vis-écrou M5 et 6 équerres de fixation de chaque côté, à l'intérieur se trouve le tube en céramique qui est utilisé pour recevoir les échantillons à fritté, il est entouré avec trois résistances en carbure de silicium SiC avec une température d'utilisation qui peut aller jusqu'à 1800 C. Pour éviter la forte perte de chaleur l'isolation thermique est assurée par un enroulement de trois couches de laine d'alumine et deux plaques réfractaires par les côtés ces dernières sont idéales pour minimiser la conductivité thermique.

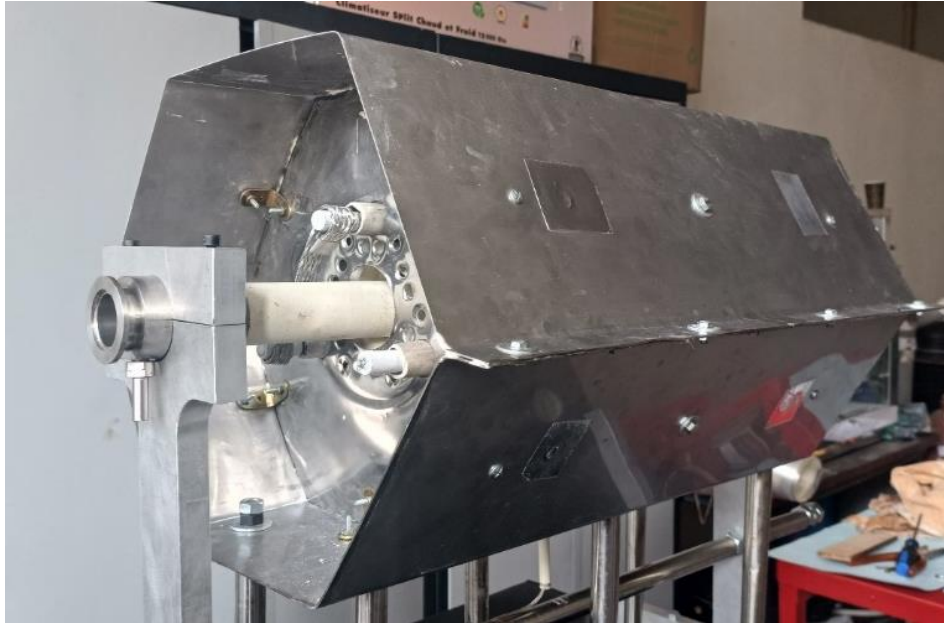


Figure IV.8 : le corps du four.

IV.3.1 Le tube du four :

C'est un tube en céramique conçu pour les fours a haut température, il est chauffé de l'extérieur, et l'intérieur constitue l'environnement de travail ou l'atmosphère est contrôlé, son diamètre extérieur est 40mm et 30mm d'intérieur sa longueur est de 700mm.



Figure IV.9 : tube en céramique.

IV.3.2 Eléments chauffants :

Le chauffage du four est assuré avec trois résistances en carbure de silicium SiC, c'est des éléments réalisés à base d'alpha carbure de silicium recristallisé, elles sont constituées d'une

zone chauffante en carbure de silicium et de zones froide dont le matériau a été imprégné de silicium métal dans le but de réduire sa résistivité.

Destinées à des applications à de haute température (1800°C). La figure IV.10 montre une photographie de la résistance en question.



Figure IV.10 : Resistance chauffante.

IV.3.3 Système d'isolation thermique :

Pour limiter au mieux les déperditions de chaleur hors du chauffage de la cellule, nous avons opté pour une double couche de matériaux à bonne isolation thermique : la laine d'alumine (Al_2O_3) et des plaques d'alumine.



Figure IV.11 : système d'isolation thermique.

- Alumine

L'alumine Al_2O_3 est un oxyde existant à l'état naturel dans la bauxite. De faible densité ($3,95 \text{ g/cm}^3$) et ayant un haut point de fusion (2072 °C) et une très faible conductivité thermique, c'est-à-dire qu'elle oppose une forte résistance au flux thermique qui la traverse. Elle est utilisée pour l'isolation thermique des fours. Sous sa forme de laine, elle est parfaitement adaptée pour cet usage étant donné qu'il est possible au fabricant de la mettre facilement en forme en remplissant tous les espaces vides dans le four afin d'assurer une meilleure isolation thermique et par conséquent une meilleure stabilité du système chauffant et permettre une économie d'énergie [23].



Figure IV.12 : Laine d'alumine.

IV.4 Système d'alimentation électrique et de régulation :

Le système d'alimentation électrique est l'ensemble régulé de composants électriques qui servent à alimenter les différents éléments du four en énergie électrique, La figure IV.13 montre un schéma de montage de l'alimentation des différents éléments électrique.

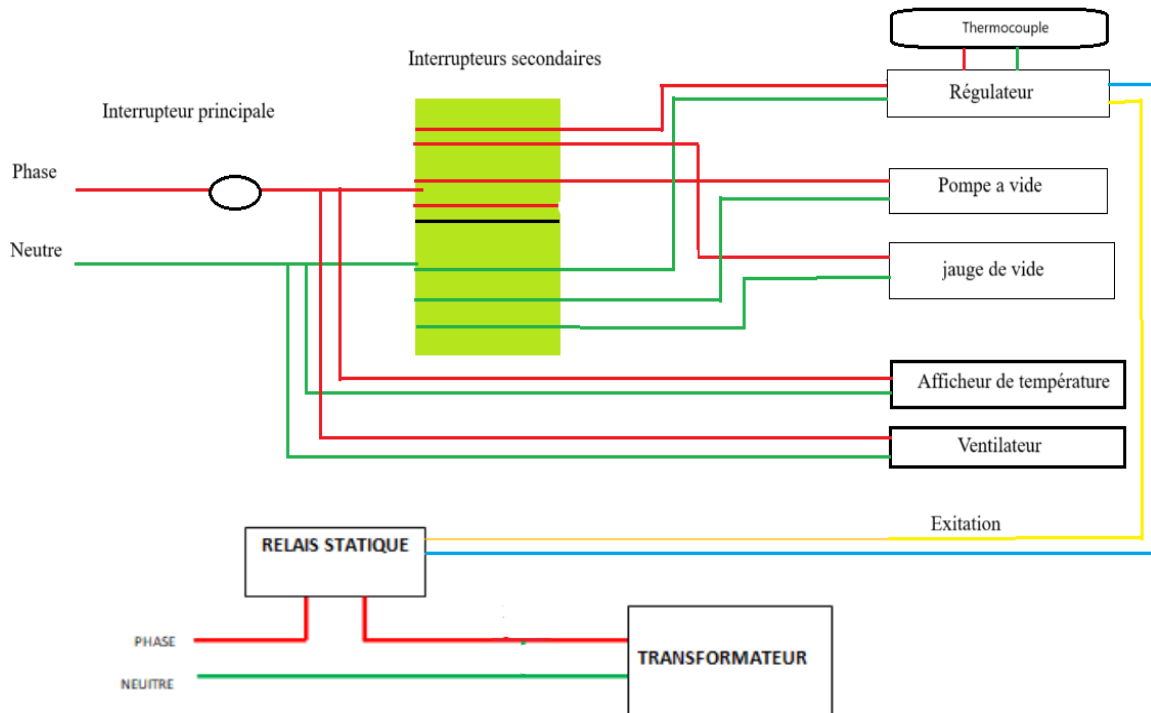


Figure IV.13 : Schéma du câblage.

L'alimentation des résistances est contrôlée au moyen d'un régulateur de températures de type Eurotherm 2408 auquel le thermocouple de type K, disposé à l'intérieur du tube. Ce thermocouple émet un signal électrique sous forme d'une différence de potentiel proportionnelle (DDP) à la température dans l'enceinte du four. Le régulateur convertit la valeur de la DDP et l'affiche en valeur de température. Il compare la valeur affichée à la valeur de la température de consigne qu'on lui aura préalablement insérer. Lorsque la température réelle (du four) est inférieure à celle de la consigne, le régulateur envoie un signal permettant au relais statique (SSR), qui fait office d'interrupteur, de fermer le circuit électrique qui alimente le transformateur pour ensuite alimente les résistances. Ces dernières se trouvent donc alimentées et chauffent le four. Lorsque la température réelle dépasse la consigne, le régulateur envoie au relai le signal d'ouverture du circuit et coupe donc le courant au transformateur alors les résistances cessent de chauffer le dispositif. La température chute alors par effet de déperditions dues aux inévitables transferts de chaleur vers l'extérieur de la cellule chauffante. Notons que le régulateur permet de lire la température instantanée dans le four. Un autre thermocouple indépendant du système de régulation est place sur le corps du four, ce dernier est utilisé comme alarme, il détecte la température dans le corps du four pour éviter un danger de surchauffe en dehors du tube de four.

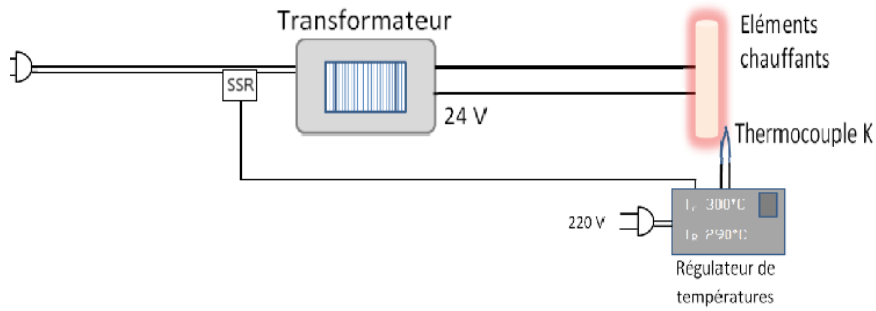


Figure IV.14 : Schéma du système de régulation de température.

IV.5 Système de contrôle de l'atmosphère :

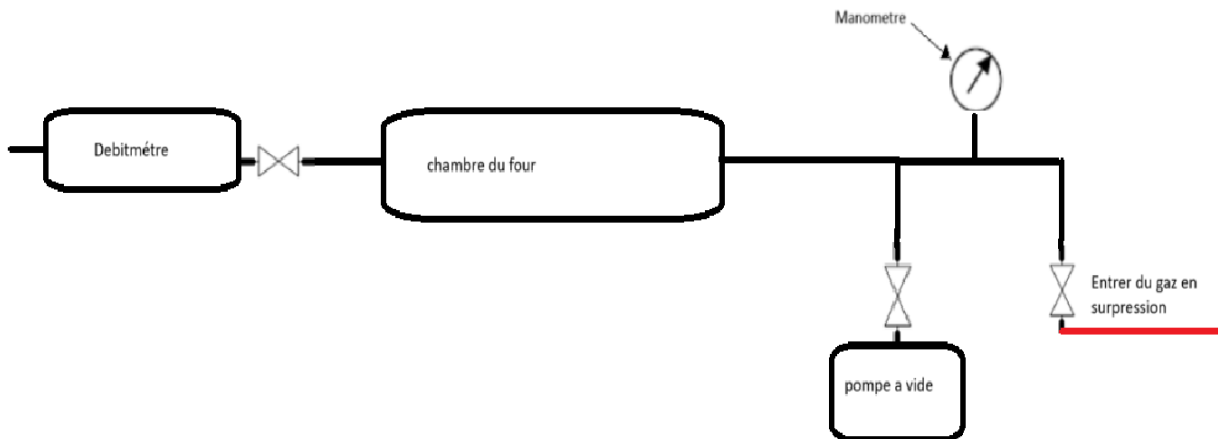


Figure IV.15 : Schéma du système d'atmosphère.

Comme notre dispositif est conçu pour le frittage en a prévu un système de gestion des gaz pour garantir le bon contrôle de l'atmosphère, pour cela en a réussi à fabriquer un dispositif multi-entrées équipé des robinets adaptés pour contrôler la pression et le vide à l'intérieur du four.

Pour faire une opération sous vide, notre four est connecté à une pompe à vide et une jauge de vide pour détecter la pression. Pour un traitement à gaz inerte (argon, azote ou mélange de gaz) on doit d'abord faire le vide puis l'isole avec un robinet conçu pour cet effet par la suite on injecte du gaz stocké dans des bouteilles du gaz via une autre connexion avec robinet



Figure IV.16 : Bouteille du gaz.

Lors du frittage avec gaz inerte, une éventuelle surpression dans le système n'est pas tolérée, donc nous avons prévu un système d'échappement (débitmètre) avec un seul sens de circulation du gaz (sans possibilité d'entrée de l'air au cas où le traitement se fera sous vide), sinon en cas de sous pression de l'air peut pénétrer de ce dernier canal et cela n'est pas envisageable, il est important alors de prévoir l'échappement sans possibilité de retour, pour lire la pression dans notre système un manomètre et branche sur le dispositif de gestion du gaz qui détecte la valeur de la pression en permanence dans notre four .

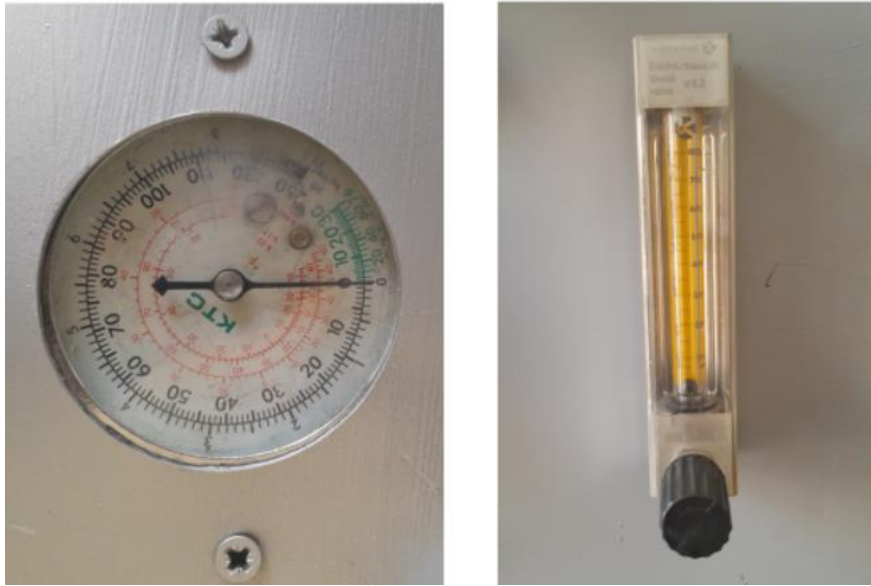


Figure IV.17 : Photographe illustrant le manomètre et le débitmètre.

IV.6 Présentation des pièces usinées :

IV.6.1 Extrémité du tube :



Figure IV.18 : Extrémité.

Deux pièces en inox sont usinées et collées sur les deux extrémités du tube à l'aide d'une colle résistante à la chaleur, le rôle de ces pièces est d'assurer le montage des autres équipements et aussi l'ouverture pour l'insertion des échantillons, ils sont aussi équipés d'un orifice pour le pompage du vide et l'injection du gaz.

IV.6.2 Emplacement du thermocouple

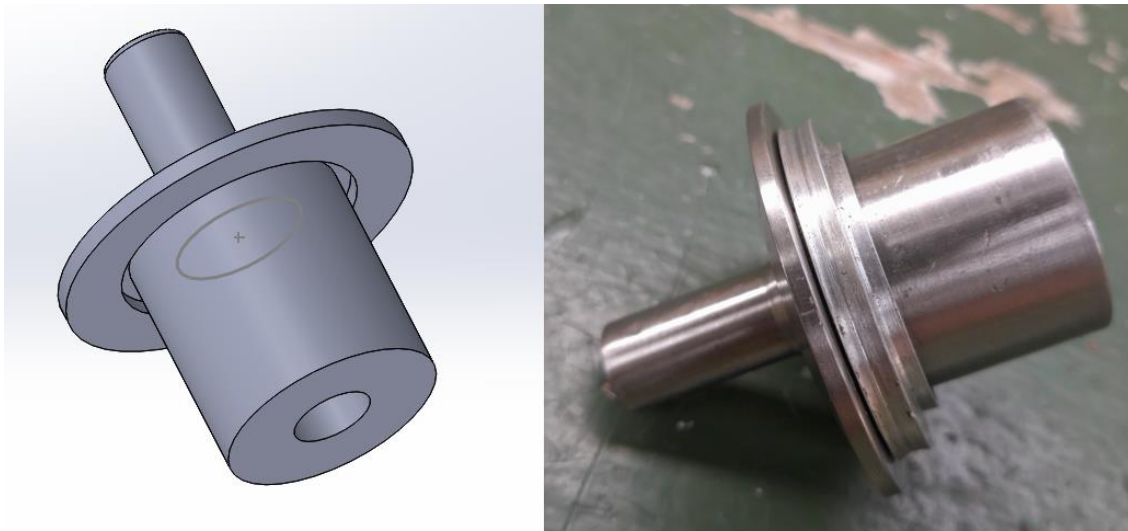


Figure IV.19 : Emplacement du thermocouple.

Cette pièce a pour rôle de guider le thermocouple lors de son introduction dans le four et de le protéger contre les agents extérieurs, elle est fixe sur l'extrémité du tube.

IV.6.3 La bague du joint :

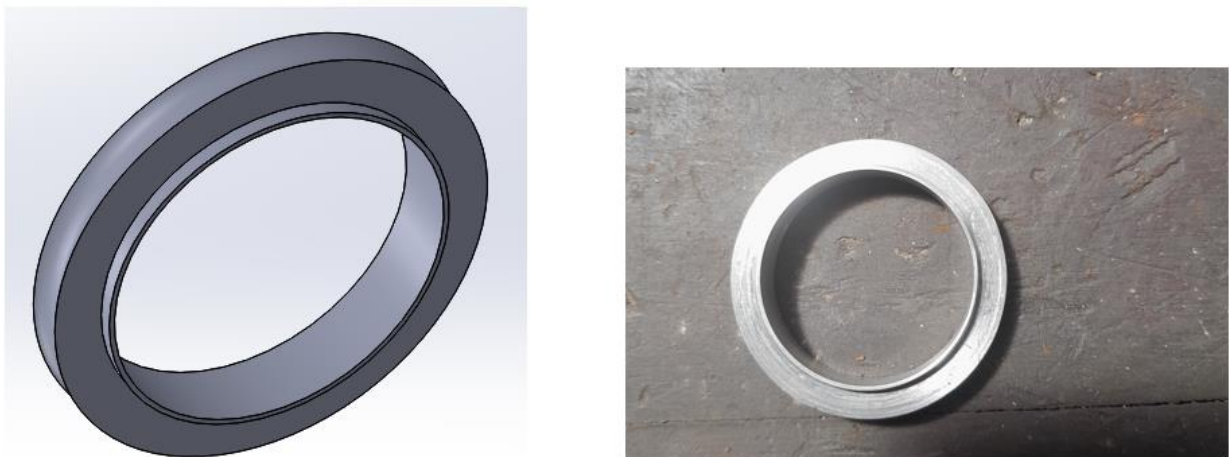


Figure IV.20 : Bague du joint.

Cette pièce sert à guider le joint entre l'extrémité du tube et l'emplacement du thermocouple et assurer l'étanchéité de système de l'atmosphère.

IV.6.4 Collier de serrage

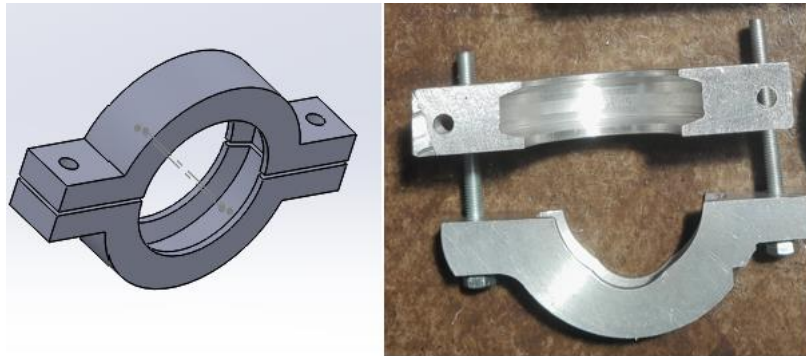


Figure IV.21 : Collier de serrage.

Cette pièce est utilisée pour la fixation de l'emplacement du thermocouple à l'extrémité du tube après avoir introduit une bague avec un joint torique, elle assure un bon serrage entre ses pièces alors une bonne étanchéité et garanti.

IV.6.5 Les supports du tube :

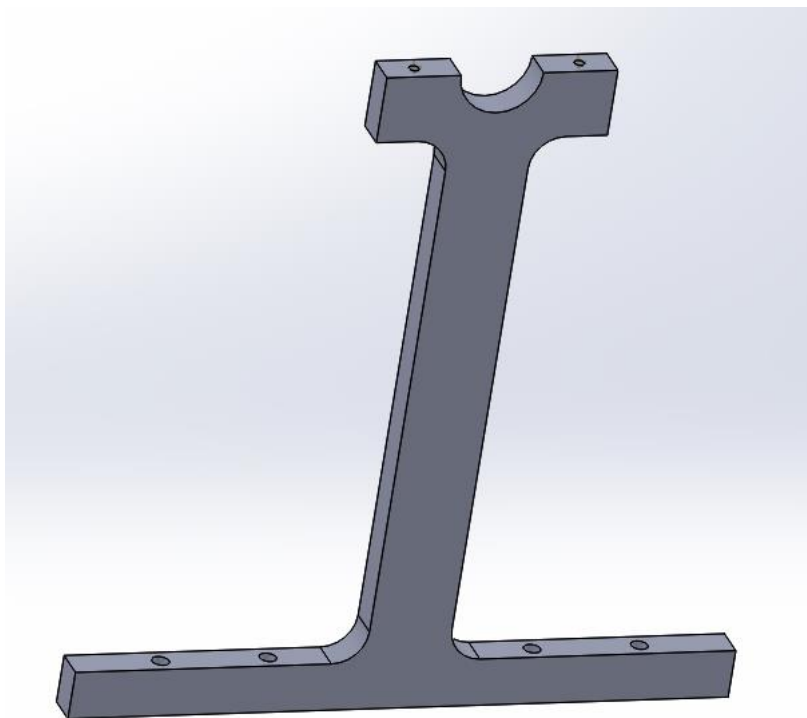


Figure IV.22 : Support.

Cette pièce a pour rôle de fixer lu tube au milieu du corps du four par ses extrémités.

IV.6.6 Plaque réfractaire

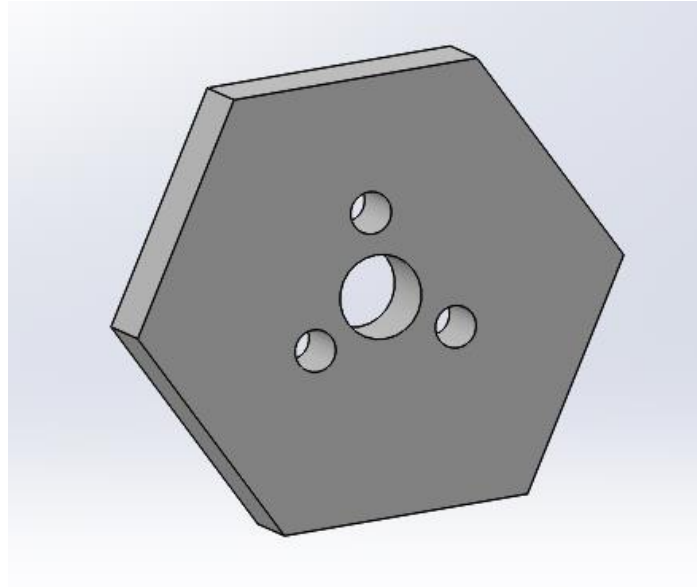


Figure IV.23 : Plaque réfractaire.

Les plaques réfractaires sont des matériaux utilisés dans la construction de fours thermiques. Elles servent à isoler thermiquement le four, à protéger ses parois contre la chaleur et les chocs thermiques, à soutenir les éléments chauffants et à résister à la corrosion chimique. Leur durabilité et leur capacité à maintenir des températures constantes en font des composants recherchés pour une variété d'applications de chauffage et de traitement thermique. Ces plaques sont taillées de sorte à épouser la forme du corps du four une de chaque côté et à servir de support pour les résistances électriques.

IV.6.7 Dispositif de gestion du gaz :

Cette pièce en aluminium, elle a pour rôle de gérer le système de l'atmosphère dans le four, il permet la connexion ou la séparation de la pompe à vide et l'injection du gaz du tube du four et aussi équié d'un raccordement avec un manomètre.

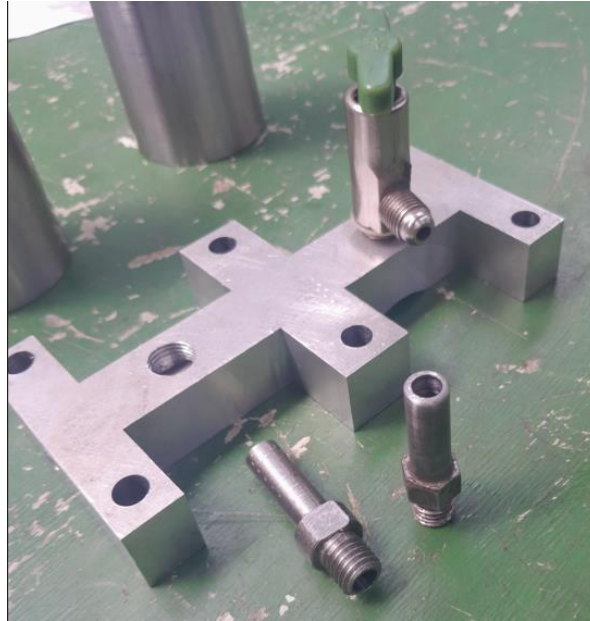


Figure IV.24 : Dispositif de gestion des gaz.

IV.6.8 Entrer du gaz :

Cette pièce, en double exemplaires, se visse sur l'extrémité du tube elle sert comme un moyen de couplement pour le pompage du vide ou injection du gaz dans le four.

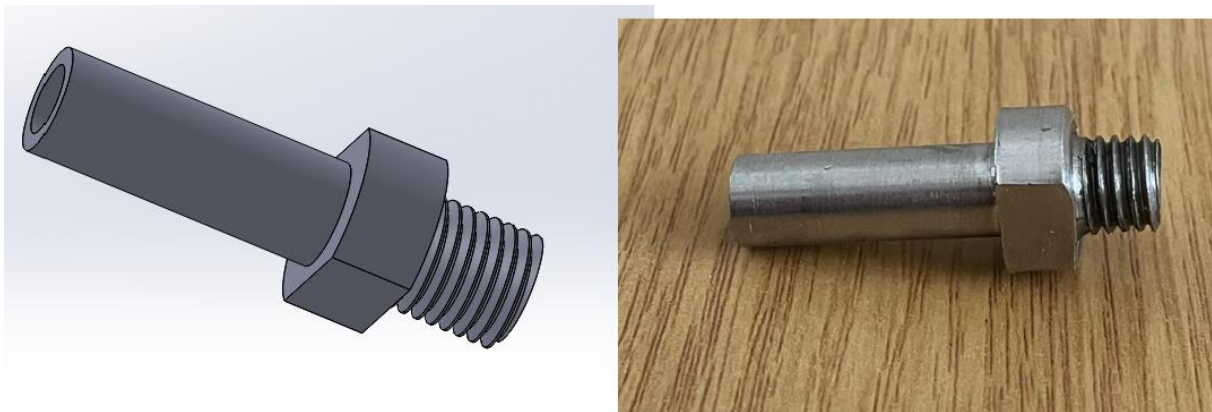


Figure IV.25 : Entrer du gaz.

A blue scroll graphic with a white border and rounded corners. The scroll is unrolled in the center, with the top and bottom edges curling upwards and downwards respectively. The text is centered on the white background of the scroll.

Chapitre V : Mise a l'essai

Réalisation et mise à l'essai

Dans cette partie nous présentons les différents dessins de définitions des pièces usinées.

Ces dessins seront utilisés comme repère pour une éventuelle fabrication en série du dispositif. Un mode d'emploi et fiche technique sont accompagnés.

I. Dessins de définitions :

Voire les planche ci-joint.

II. Fiche technique :

Le but de notre travail est de fabriquer un four de frittage, il permet de réaliser des cycles thermiques sous atmosphère inerte (Argon ou azote) à des températures peuvent atteindre 1700 C.

IV.1 Principale caractéristique technique :

- Alimentation électrique : 220V, 50Hz.
- Gaz de traitement : argon, azote et gaz neutre.
- Température maximale : 1700 C
- Régulation PID du cycle thermique : rampe de chauffage (en °C/min), maintien la température de consigne SP1 pendant une durée Dwell (en min) et refroidissement avec rampe (en °C/min).
- Régulation manuelle de l'atmosphère de traitement thermique : sous vide primaire (jusqu'à 10⁻³atm.) ou sous atmosphère contrôlée en gaz inerte (pression maximale 2 atm).

IV.2 Eléments de contrôle du four

La figure 1 montre une photographie du tableau de commande du four.

- En haut à droite nous trouvons trois interrupteurs bipolaires permet d'alimenter en électricité le régulateur, la pompe à vide, la jauge de vide.
- Juste sous les interrupteurs se trouve le commutateur principal il permet en l'actionnant au moyen d'une clé adaptée d'alimenter le circuit du four.
- Le régulateur de température est disposé en haut c'est le régulateur qui permet de faire exécuter le cycle thermique.
- Manomètre indiquant la pression dans le four. Cet appareil indique les pressions.
- Robinet d'admission du gaz de traitement : ce robinet permet de maîtriser le débit du gaz rentrant dans le four.

- Débitmètre servant à estimer le débit du gaz d'échappement (gaz en « surpression » dans le four). Le robinet de réglage du débit permet de maintenir une pression donnée dans le four.
- Jauges de vide : ces instruments permettent de situer avec une meilleure précision (que celle du manomètre) le niveau de vide primaire atteint le vide secondaire.
- Le robinet d'ouverture vers la pompe à vide : lors de l'utilisation de la pompe à vide, il est plus prudent de réaliser un pompage progressif. Raison pour laquelle ce robinet est placé.

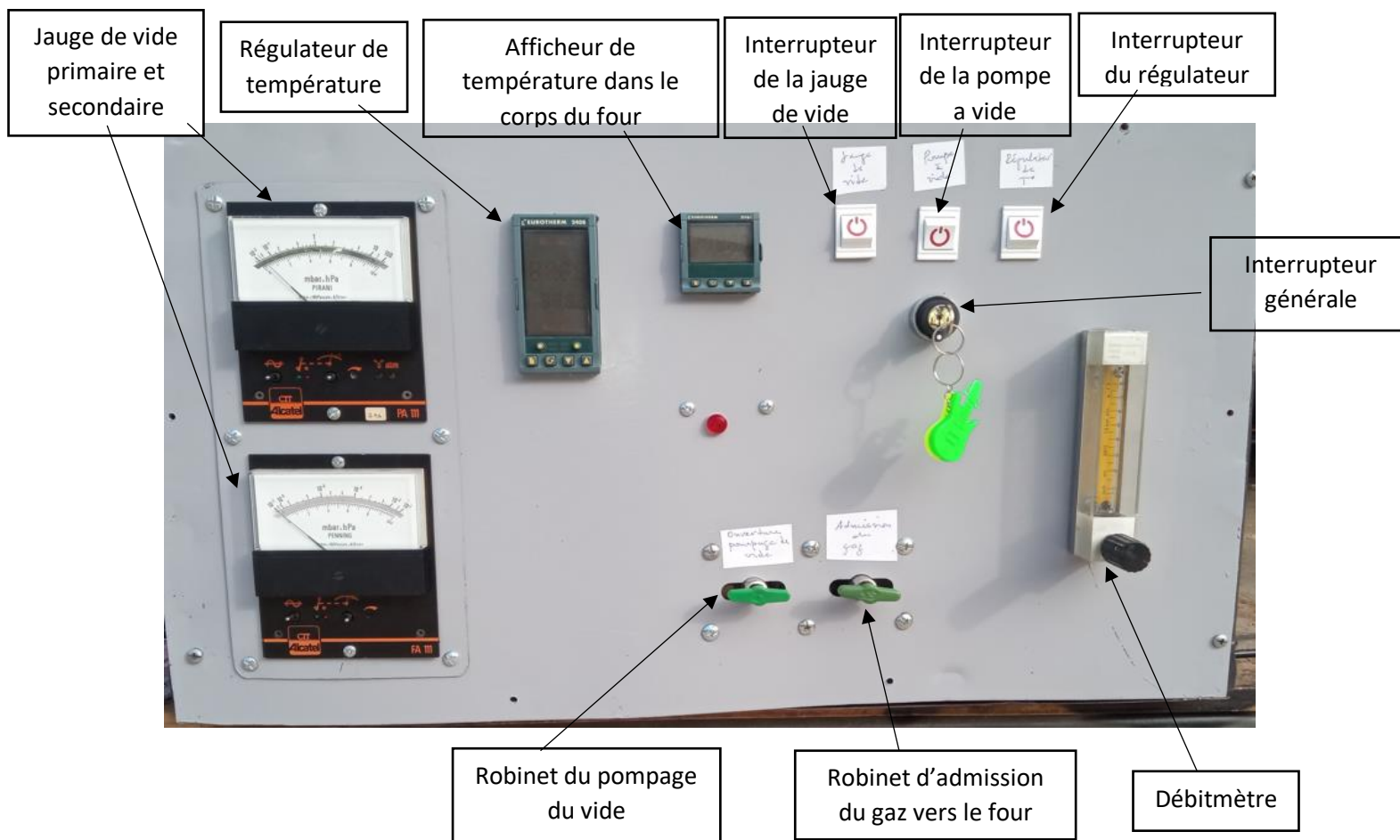


Figure 1 : vue générale du tableau de commande du four.

III. Mode d'emploi :

Avant toute manipulation d'un quelconque élément du four, vérifier sa dernière utilisation (notes mentionnées dans le registre de l'appareil)

- 1) Vérifier, sinon ouvrir les robinets pour remettre le four sous atmosphère. Vérifier que la bouteille de gaz est bien fermée. Vérifier, à travers le manomètre, que la pression dans le four est de 1 atm.
- 2) Mettre l'ensemble sous tension en tournant la clé de l'interrupteur général.
- 3) Actionner le régulateur de température au moyen du bouton prévu à cet effet. La température dans le four doit s'afficher (en haut). **Si cette température est supérieure à 200°C, ne pas poursuivre les étapes ci-après (risques de brûlures).**
- 4) Ouvrir le bouchon de fermeture du four en desserre le collier de serrage, les mettre sur la table
- 5) Placer l'échantillon, bien préparé, dans une nacelle en alumine avec couvercle. Dans le cas où l'échantillon est de dimensions supérieures à celles de la nacelle, utiliser les plaques fines en céramique. Pour une meilleure précision, positionner l'échantillon au milieu du tube. (Le thermocouple est situé à ce niveau). Remettre la bague du joint et le joint sur l'extrémité remettre le bouchon et assurer un bon serrage avec le collier de serrage.
- 6) Fermer tous les robinets de contrôle de l'atmosphère du four.
- 7) Actionner la pompe à vide à l'aide de l'interrupteur. Ouvrir le robinet progressivement, Attendre jusqu'à ce que le vide primaire soit atteint (aiguille du manomètre sur les graduations de la zone $P < 1$ atm). Maintenir le pompage du vide pendant une dizaine de minutes, actionner la jauge de vide pour vérifier le niveau poussé du vide.
- 8) Terminez l'opération par fermeture du robinet de pompage de vide puis désactiver la pompe à vide.
- 9) Pour un traitement thermique sous argon (ou azote), ouvrir la bouteille de gaz et régler son manomètre, Dès que la pression dans le four atteint 1 atm, ouvrir, simultanément mais graduellement, le robinet d'échappement de gaz en « surpression » situé sur le débitmètre.

Attention : Ne pas réaliser de traitement sous vide dynamique (pompage en continu) d'échantillons pouvant dégazer à la température de traitement.

IV. Conclusion :

Au terme de cette série d'essais nous constatons que des améliorations doivent être apportées essentiellement sur le côté esthétique et le choix des matériaux car pour ce prototype nous nous sommes contenté des éléments dont nous disposons (tuyaux, profilés, tôles,



Chapitre VI

Expositions du projet startup

I. Introduction

La recherche et développement dans le domaine des matériaux dure a subi un énorme retard dans notre pays au vu des avancées enregistrées dans le pays industrialisé et émergents.

En effet, les secret industriels et la maîtrise technologique ne constituent plus un mystère ni un obstacle au développement de l'industrie des matériaux durs dans certains pays pourtant peu avancés il y a une vingtaine d'années ; période à laquelle les chercheurs et industriels algériens avaient un certain savoir dans le domaine. Depuis, le manque d'empressement quant à la nécessité de développer cette filière (fabrication des matériaux dure) risque de perdre le savoir-faire d'une génération de personnels compétents dans le domaine.

Parmi les moyens utiles dans un laboratoire de matériaux, incluant cette thermique de recherches, un four fonctionnement sous atmosphère contrôlée est d'une nécessité avérée.

II. L'idée

Avant l'invention du four de frittage sous atmosphère contrôlée, plusieurs problèmes entravaient le processus de frittage, notamment l'oxydation et la contamination des matériaux, qui altéraient les propriétés mécaniques et l'apparence des métaux et alliages en raison de la réaction avec des contaminants comme l'oxygène et l'humidité. De plus, le contrôle de la densification uniforme était difficile, ce qui pouvait entraîner des défauts structurels et des zones de faiblesse dans les pièces produites. Les propriétés matérielles, telles que la résistance à la corrosion ou la conductivité, étaient également compromises sans atmosphère contrôlée, limitant ainsi les applications possibles des matériaux. La fabrication de pièces complexes souffrait de déformations et de fissures sous des conditions non contrôlées, rendant difficile la production de composants de haute précision, notamment dans les secteurs aérospatial et médical. Enfin, l'absence d'un contrôle précis des paramètres de frittage entraînait une perte d'efficacité énergétique, nécessitant des cycles de chauffe plus longs. Ainsi, l'invention du four de frittage sous atmosphère contrôlée a permis de remédier à ces problèmes en offrant un contrôle précis et constant des conditions de frittage, réduisant les risques de contamination et de déformation, tout en optimisant les performances matérielles et les rendements de production. Cette innovation vise à maîtriser l'environnement thermique et chimique pour améliorer la qualité des matériaux, optimiser leurs propriétés et permettre la fabrication de pièces de haute précision et performance.

III. Présentation du projet

La conception et la réalisation d'un four tubulaire sous atmosphère contrôlée est un projet qui, en fonction des possibilités de la réalisation effectif d'un prototype fonctionnel, est brevetable et qui peut faire l'objet d'une entreprise industrielle.

Des essais, s'ils s'avèrent concluants, permettront de démontrer la possibilité de développement d'un procédé de fabrication d'outils de coupe et /ou de forage pétrolier aussi, sinon plus performants que les produits actuellement commercialisés.

IV. L'objectif du projet

Dans les laboratoires de recherche, qu'ils soient universitaires ou industriels, l'objectif est de concevoir des dispositifs capables de simuler les conditions dans lesquelles les matériaux opèrent durant leur utilisation. Cela permet de mener des études approfondies et de prédire leur comportement.

L'objectif principal d'un four tubulaire sous atmosphère contrôlée est de créer un environnement thermique et chimique optimal pour le traitement de matériaux sensibles, tels que les métaux et les céramiques. En introduisant des gaz inertes ou réactifs dans la chambre de chauffe, ce type de four protège les matériaux de l'oxydation et d'autres réactions néfastes avec l'air, ce qui améliore la qualité du produit final et réduit les défauts. De plus, il permet un contrôle précis des conditions de frittage, favorisant une densité uniforme et des propriétés matérielles optimales. Cette technologie est essentielle pour des applications variées, allant du frittage de poudres métalliques à la fabrication de pièces complexes nécessitant une haute précision, tout en garantissant une efficacité énergétique accrue.

V. Les aspects innovants

Les aspects innovants résident dans la capacité du four conçu à :

- 1- Réaliser des traitements thermiques et thermochimiques selon des cycles thermiques précis (robustesse meilleure que celle des fours à chambre actuellement importés).
- 2- Réaliser des traitements sous atmosphères réductrices, voire agressives grâce à une unité adéquate pour la gestion des gaz.

VI. Domaines d'Activité

1. Métallurgie

Ces fours sont couramment utilisés pour le frittage de poudres métalliques, permettant d'obtenir des pièces avec une densité élevée et des propriétés mécaniques optimales. Ils sont essentiels dans la fabrication de composants pour l'aérospatiale, l'automobile et d'autres industries nécessitant des matériaux à haute performance.

2. Céramiques Techniques

Dans le secteur des céramiques, les fours à atmosphère contrôlée permettent de traiter des matériaux céramiques avancés, garantissant une qualité supérieure et une résistance accrue. Ils sont utilisés pour le délintage et le frittage de céramiques fonctionnelles, essentielles dans l'électronique et les applications médicales.

3. Recherche et Développement

Ces fours jouent un rôle crucial dans les laboratoires de recherche, où ils sont utilisés pour étudier le comportement des matériaux sous différentes conditions atmosphériques. Cela permet d'innover et de développer de nouveaux matériaux avec des propriétés spécifiques.

4. Industrie Électronique

Les fours de frittage sont également utilisés pour la fabrication de composants électroniques, où un contrôle précis de l'atmosphère est nécessaire pour éviter l'oxydation et garantir la conductivité électrique.

5. Fabrication Additive

Dans le cadre de la fabrication additive, ces fours permettent le traitement thermique des pièces imprimées en 3D, améliorant leur densité et leurs propriétés mécaniques après impression.

VII. Horizons du projet

- 1-possibilité de faire breveter le four (très fortes chances en Algérie, même à l'international).
- 2-possibilité de création d'une startup qui se spécialisera dans la fabrication de ce four.

VIII. Clients potentiels 1-Etablissements de recherche et industriels spécialisés

2-ENSP, ex-ALDIM

3-petite et moyennes entreprises de fabrication des outils de coupe

IX. Responsables du projet

Les porteurs de projet

YAHY KARIM (Co-fondateur) : Étudiant en Master 2 génie mécanique, spécialité fabrication mécanique et productif à la faculté Génie de la Construction, Université Mouloud Mammeri Tizi-Ouzou. Titulaire d'une licence en construction mécanique

MAMOUNI YACINE (Co- fondateur) : Étudiant en Master 2 génie mécanique, spécialité fabrication mécanique et productif à la faculté Génie de la Construction, Université Mouloud Mammeri Tizi-Ouzou. Titulaire d'une licence en construction mécanique

L'encadrement

Ce projet a été encadré par M. NECHICHE Mustapha

Ci-après ces qualifications : Docteur en Génie mécanique et enseignant-chercheur dans la thématique frittage et synthèse des phases céramiques techniques



Conclusion générale

Conclusion générale

La conception et la fabrication d'un four électrique de laboratoire atteignant de très hautes températures est une opération de longue haleine et nécessite une planification minutieuse. Elle nécessite le recours à un ensemble de techniques et compétences liées au domaine de fabrication mécanique et aussi une compréhension approfondie sur le frittage des matériaux afin d'atteindre un résultat plus optimal.

A la fin de notre travail nous avons pu concevoir et fabriquer un dispositif qui répond à l'exigence que nous nous avons fixé (atmosphère contrôlée, la température et temps de maintien, contrôle du cycle thermique).

La première partie de la réalisation de notre prototype s'est articulée autour de la conception et fabrication de différents composants de notre four au niveau du hall de technologie à OUED AISSI, et cela s'est fait à l'aide des machines de tournage, fraisage, perçage...

La deuxième partie est focalisée sur le montage de différents composants usinés et ainsi le branchement du circuit électrique dans lequel on a utilisé un système de régulation de température de type PID qui nous offre une stabilité et une régulation de haute précision.

Dans la troisième partie nous avons fait le branchement du système de gestion des gaz qui nous permet de pouvoir effectuer des opérations de frittage sous atmosphère contrôlée.

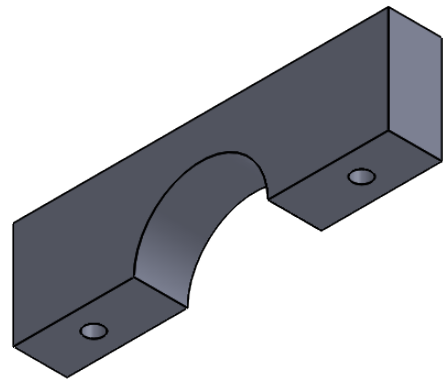
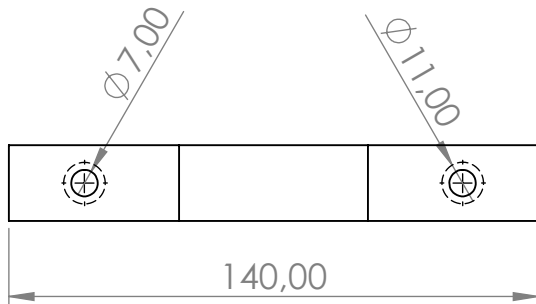
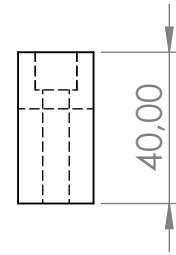
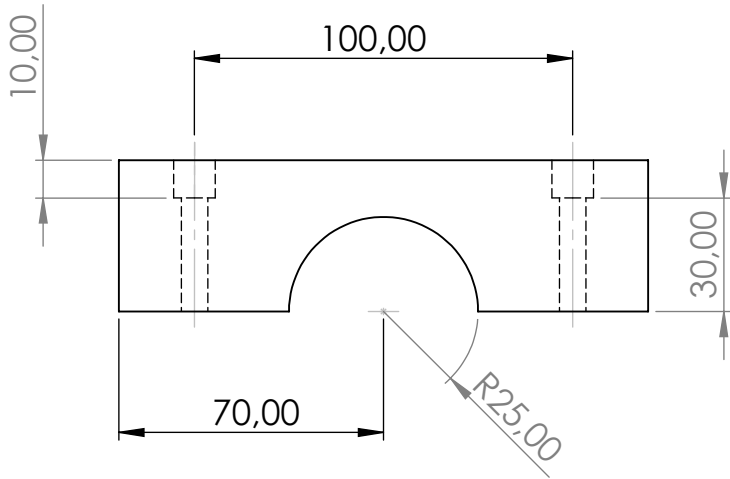
Au cours de ce travail, nous nous sommes confrontés aux contraintes liées à la conception et fabrication mécanique et nous avons mis à profit des connaissances académiques reçues au cours de notre formation. Nous avons pu, à travers ce projet, réaliser un four électrique de frittage pour usage de laboratoire. Cependant, nous pensons que des études restent encore à faire au niveau du système d'isolation thermique et aussi prévoir un système de refroidissement pour pouvoir réussir à atteindre de plus hautes températures sans risque d'endommagement du dispositif.

Références

- [1] Philippe Boisseau, la conception mécanique, méthodologie et optimisation 2eme édition, Dunod, Paris, 2011, 2016.
- [2] : Fatima ezzahra benchaouia, conception et calcul du protecteur d'un disque frein avant, Projet de fin d'étude, 2016.
- [3] : Roland D. Well, conception des gammes d'usinage, revue technique d'ingénieur B7025.
- [4] MOUSSOUM HOCINE, BOUKHALFA Yamin, Étude, conception et réalisation d'une enceinte de frittage sous charge, Projet de fin d'étude, 2017.
- [5] KERRICHE ADEL, DJEBARI HAKIM, Conception et réalisation d'une mini extrudeuse pour l'élaboration des matériaux composites, 2020.
- [6] Philippe Gérard, Analyse des décisions en conception, revue technique d'ingénieur. AG2220.
- [7] Stéphane Grès, Approche à la conception d'un système complexe, revue technique D'ingénieur 2007.
- [8] Philippe Gérard, Analyse des décisions en conception, revue technique d'ingénieur. AG2220.
- [9] : Cleade Jean, Analyse de la valeur, revue technique de l'ingénieur.
- [10] : CHACHA SEIFEDDINE ET BENDJEMAI MOHAMMED AMINE SADEK, Etude de conception et optimisation d'un assemblage par un logiciel de CAO_SOLIDWORKS, 2022.
- [11] Michel Baes, Max Bourcart, Christian Lagoutte, revue technique d'ingénieur, 2004.
- [12] - Éduscol. (2022, mars 11). Agrégation externe de sciences industrielles de l'ingénieur (SII) - 2022. Éduscol STI.
- [13] M. Eudier : fabrication des produits frités. M864 .Techniques de l'ingénieur.
- [14] - Bonnet J. P., Bernache-Assolan D. Frittage : Aspect physico chimique – Partie 1: frittage en phase solide. Technique de l'ingénieur, AF 6 6620, 2005.
- [15] - ABDI BELKACEM, conception et réalisation d'un four de frittage, projet fin d'étude 2023.
- [16] -L olmos: étude de frittage de poudre par microtomographie in situ et modélisations Discrète. Génie des procédés. Institut national polytechnique de Grenoble-INPG, 2009.



Mises en plan



ECHELLE 2 : 1

Bride du support

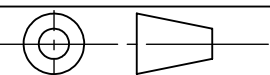


PLANCHE N

UMMTO-FGC-FMP

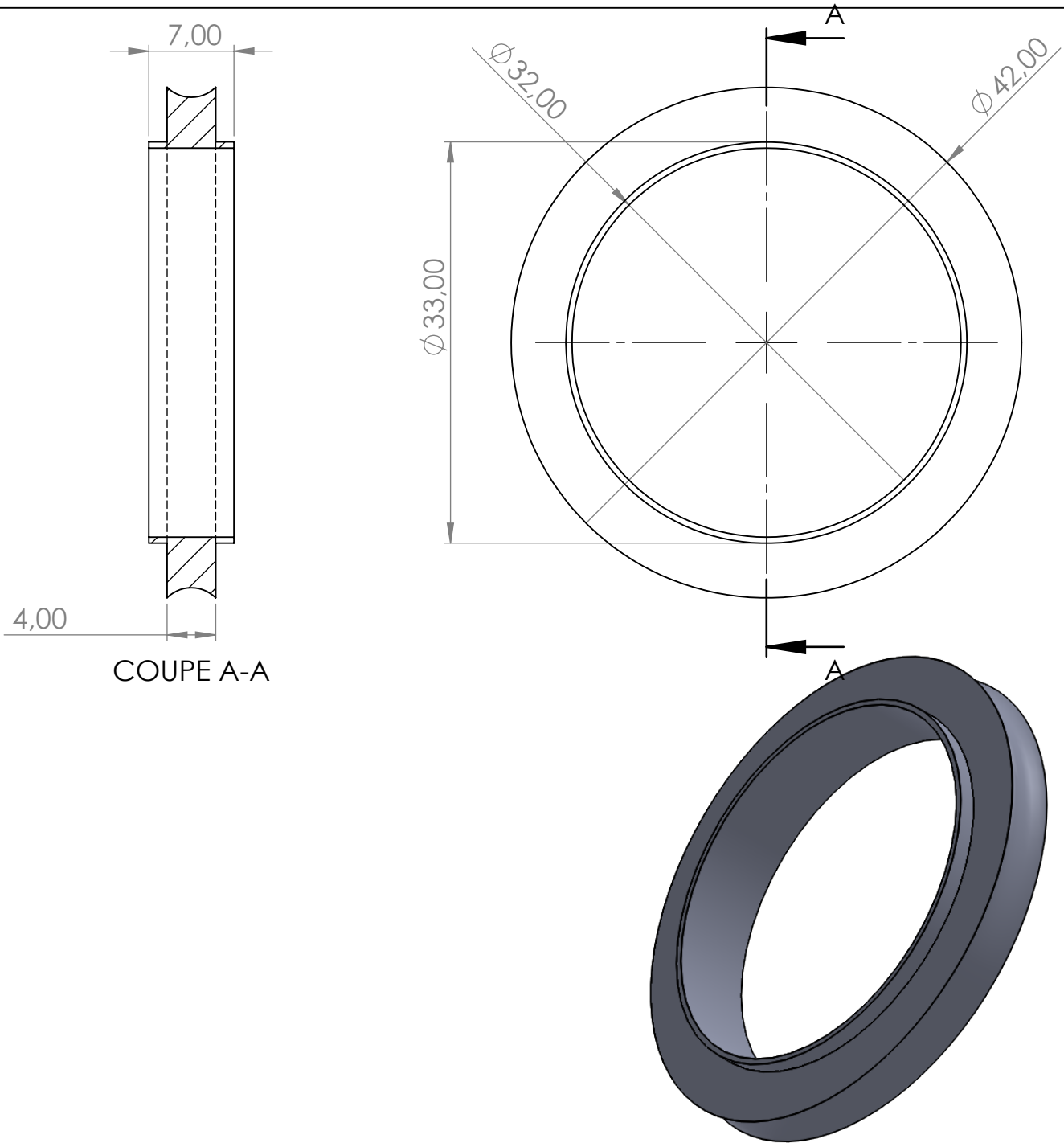
PFE

A4

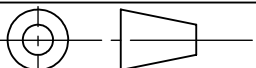
M2

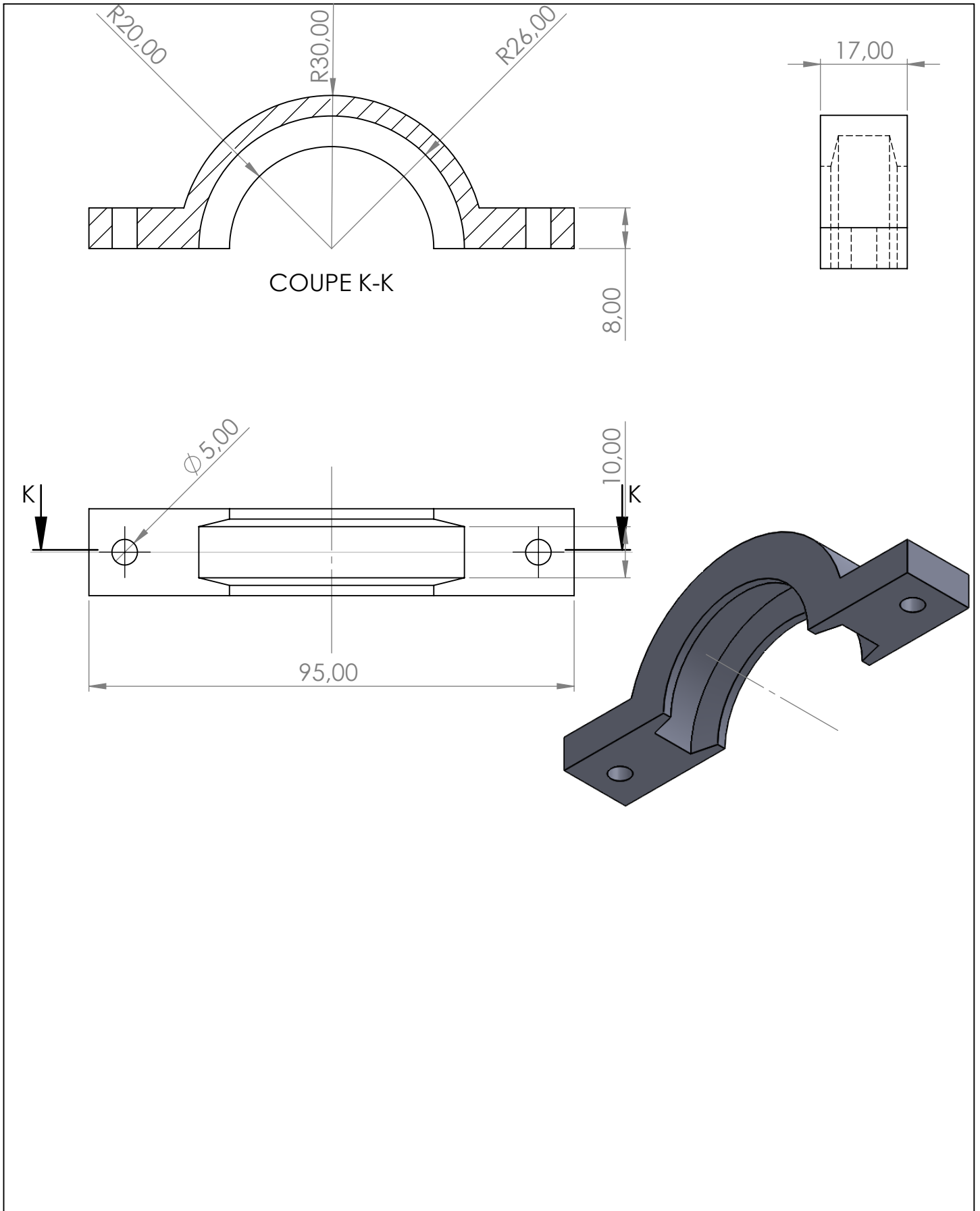
MAMOUNI - YAHI

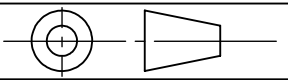
Promotion 2024

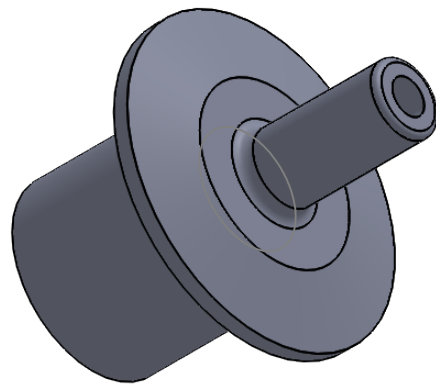
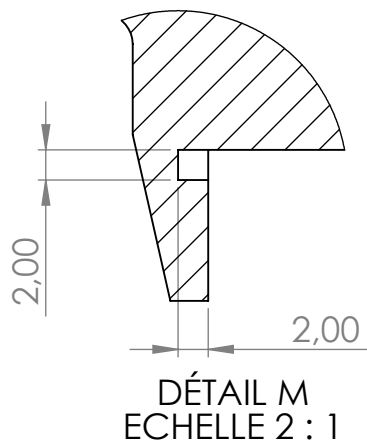
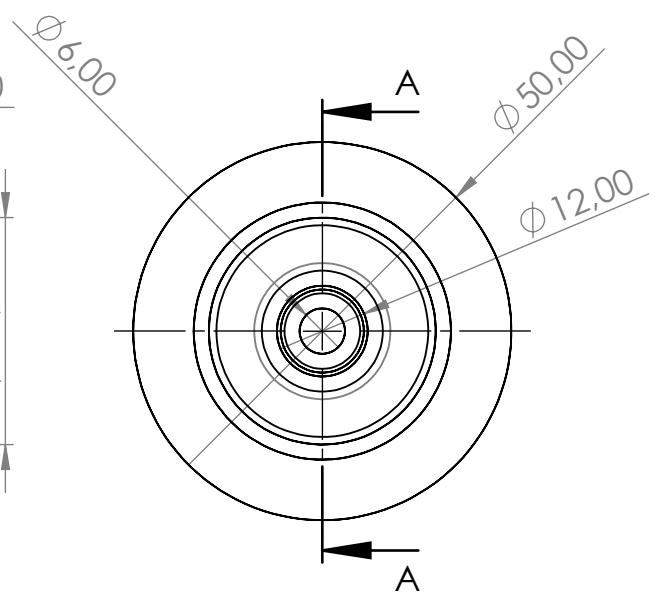
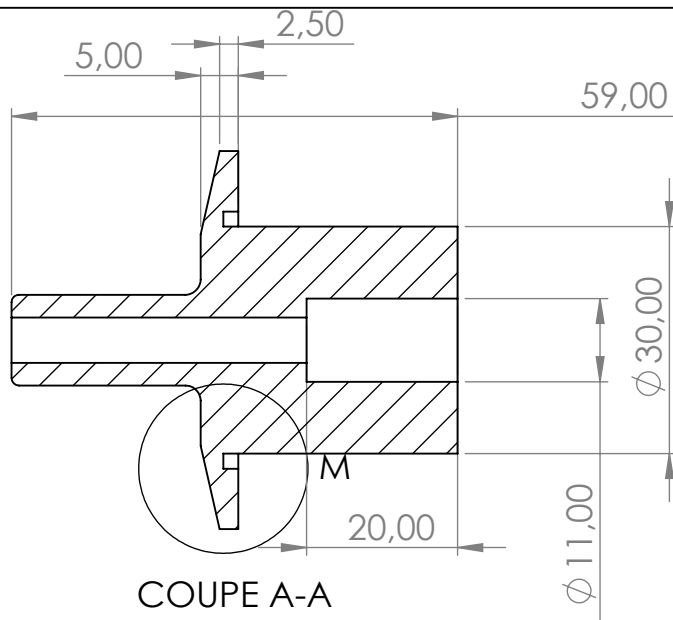


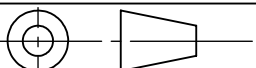
IT = ± 0.5 Sauf indication

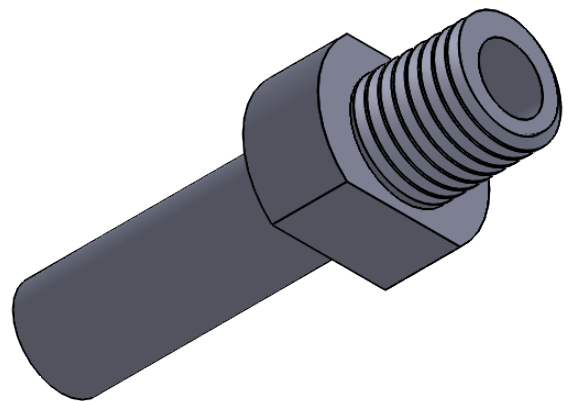
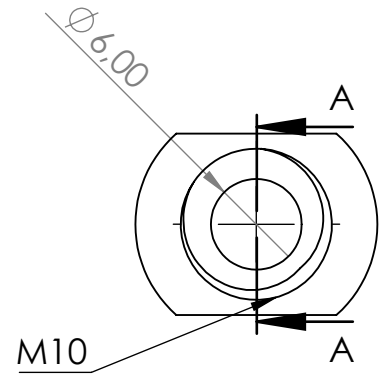
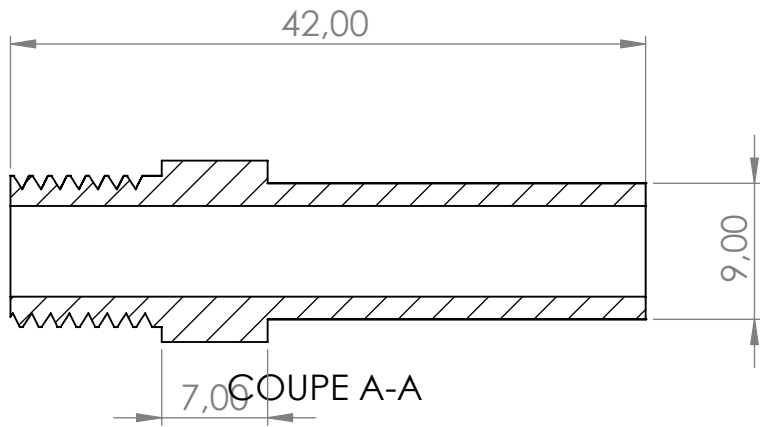
ECHELLE 2 : 1	Cage du joint		
			
PLANCHE N	UMMTO-FGC-FMP		PFE
A4	M2	MAMOUNI - YAHI	Promotion 2024



ECHELLE 1 : 1	Collier de Serrage		
			
PLANCHE N	UMMTO-FGC-FMP		PFE
A4	M2	MAMOUNI - YAHY	Promotion 2024



ECHELLE 1 : 1	Emplacement du thermocouple		
			
PLANCHE N	UMMTO-FGC-FMP		PFE
A4	M2	MAMOUNI - YAHI	Promotion 2024



IT = ± 0.5 Sauf indication

ECHELLE 2 : 1

L'entrer du gaz

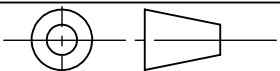


PLANCHE N

UMMTO-FGC-FMP

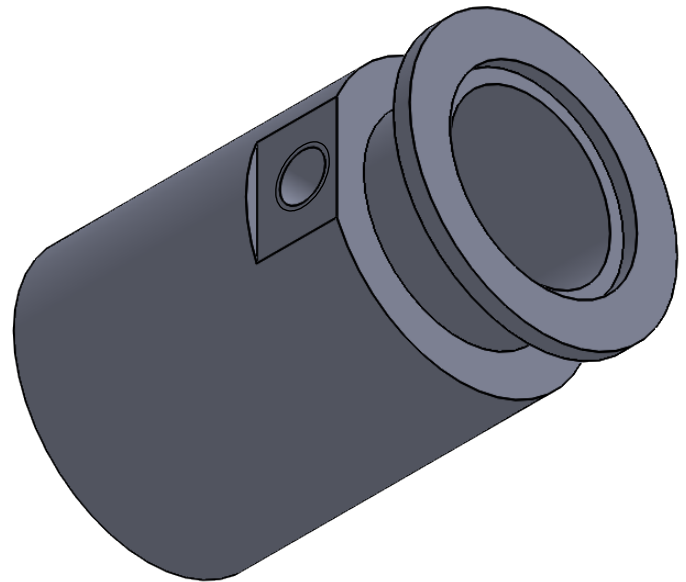
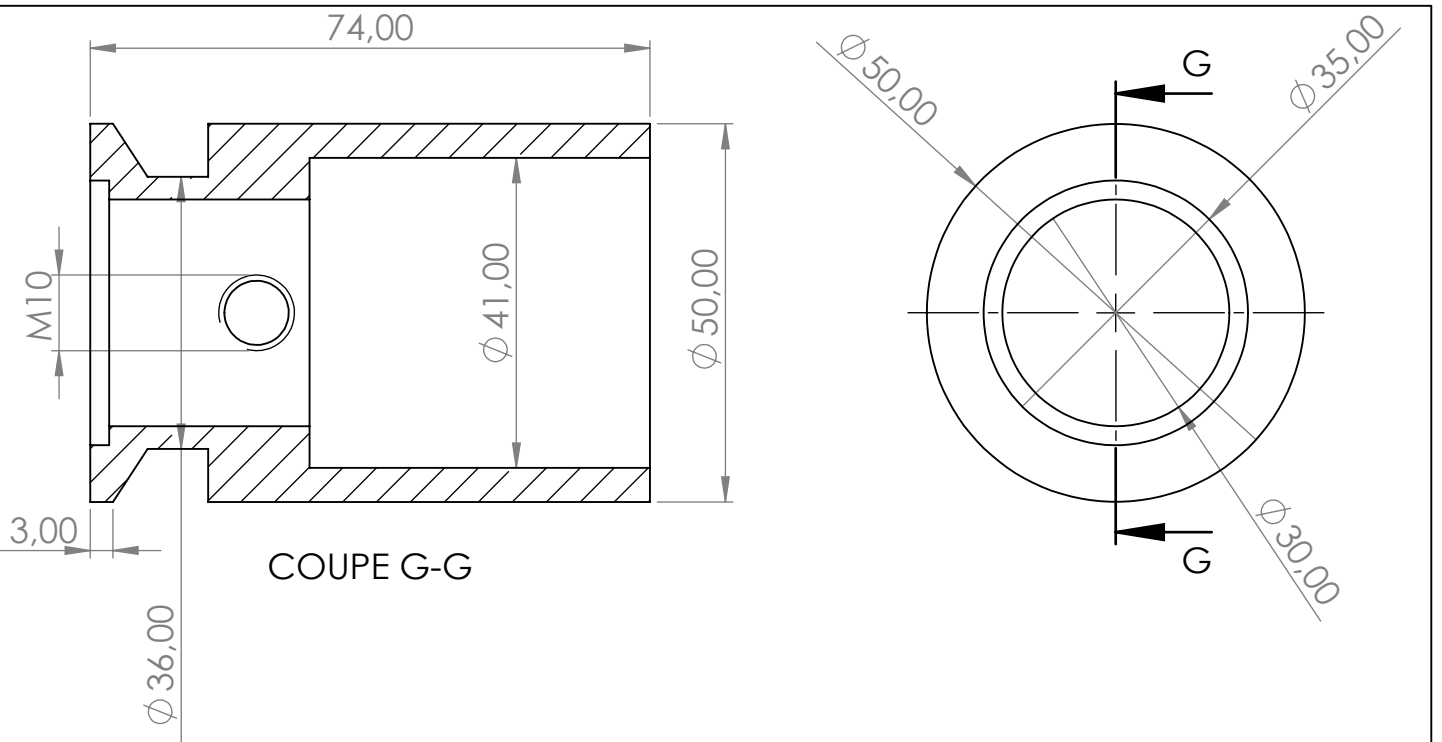
PFE

A4

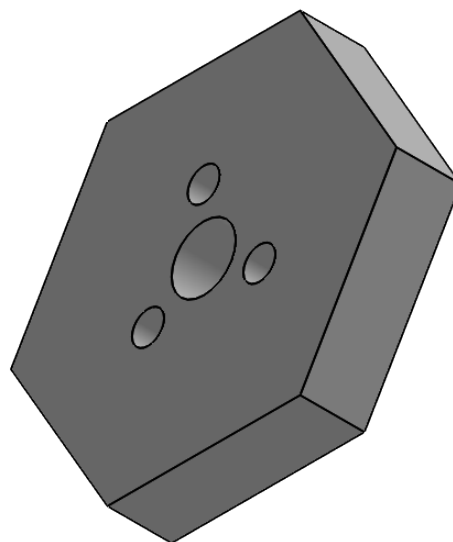
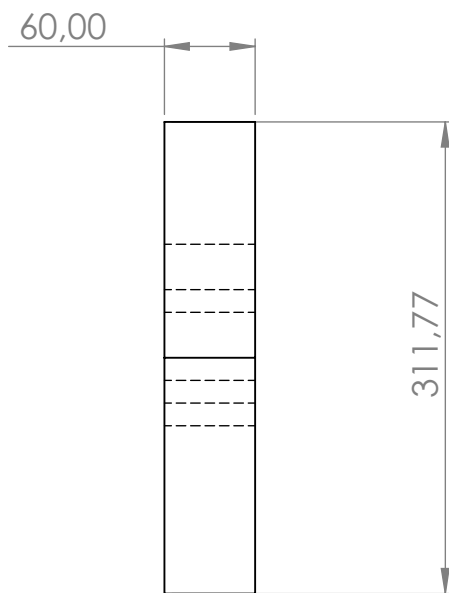
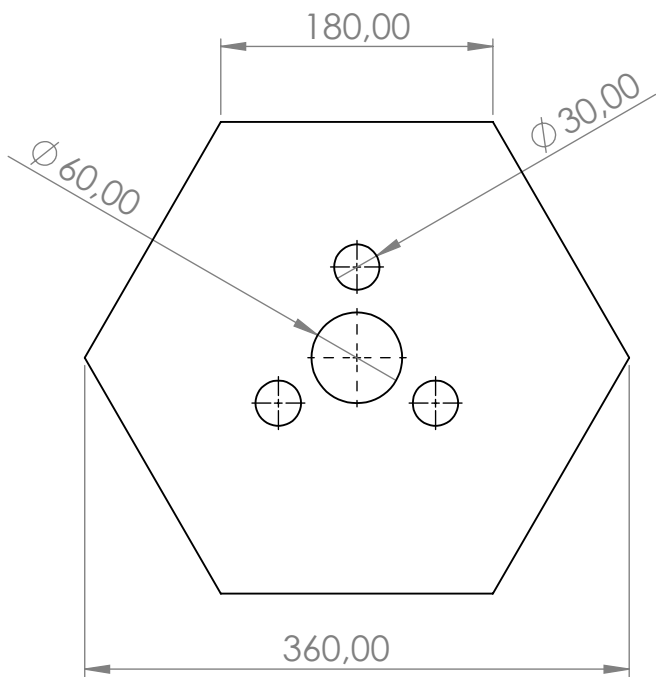
M2

MAMOUNI - YAHI

Promotion 2024



ECHELLE	Étrémité du tube		
PLANCHE N	UMMTO-FGC-FMP		PFE
A4	M2	MAMOUNI - YAHI	Promotion 2024



ECHELLE 1 : 5

Plaque réfractaire

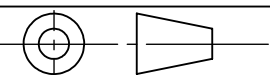


PLANCHE N

UMMTO-FGC-FMP

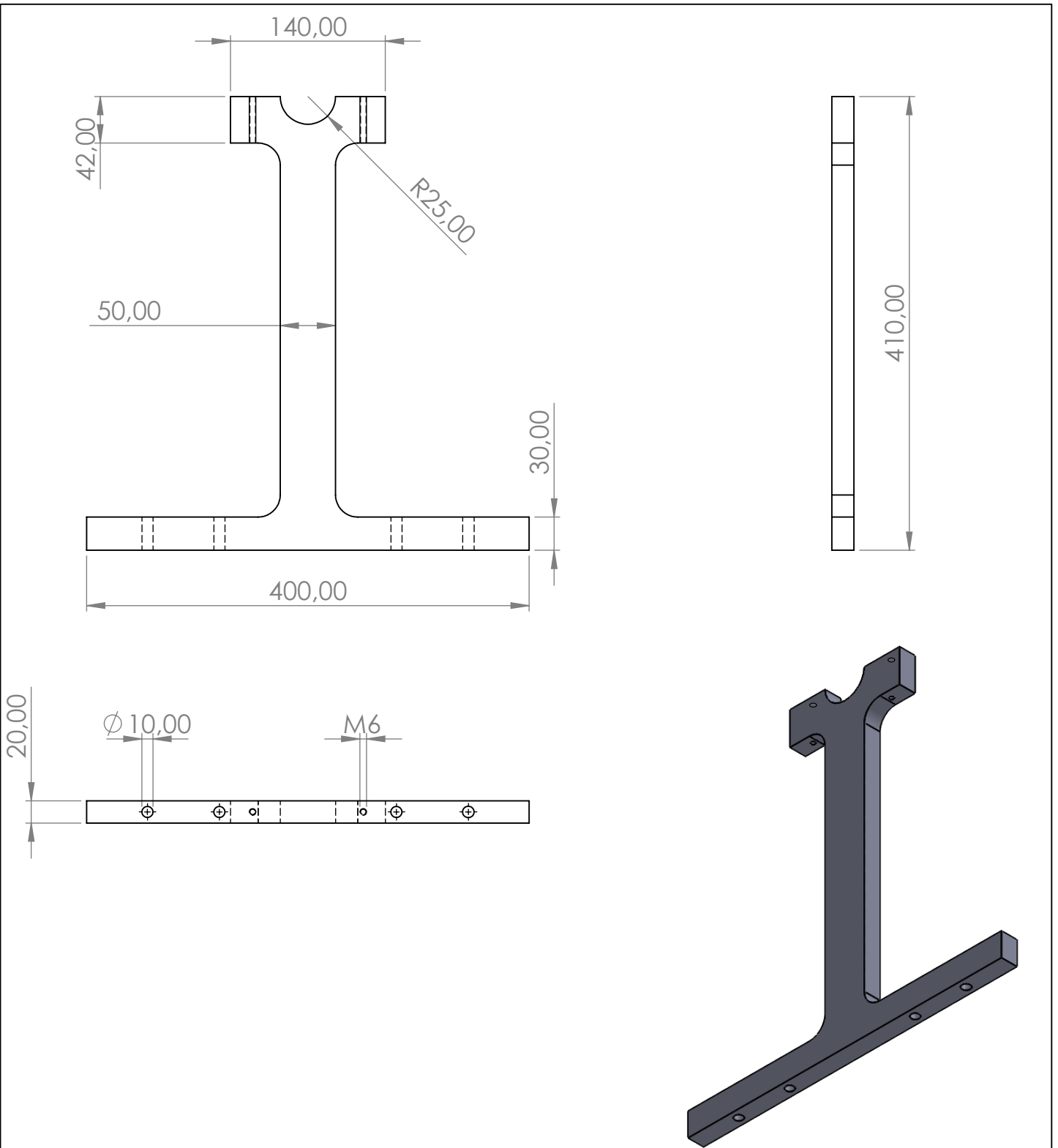
PFE

A4

M2

MAMOUNI - YAHI

Promotion 2024



IT = ± 0.5 Sauf indication

ECHELLE		Support du tube	
PLANCHE N		UMMTO-FGC-FMP	PFE
A4	M2	MAMOUNI - YAHI	Promotion 2024

Résumé

Ce présent projet de fin d'études sous le thème conception et réalisation d'un four de frittage tubulaire sous atmosphère contrôlée, concentre sur le développement d'un dispositif permettant de simuler l'opération de frittage des matériaux initialement en forme de poudre afin d'obtenir une pièce finale plus performante en termes de caractéristiques physiques et une grande résistance aux sollicitations mécaniques.

L'objectif de ce mémoire est de concevoir un prototype capable d'atteindre de grande température et de la maintenir selon un palier précis ainsi de gérer l'atmosphère d'une manière correcte que ce soit sous vide ou sous gaz inerte. Cela peut aider mieux pour le développement des matériaux plus performants et robustes pour les applications industrielles.

Un four de frittage est un dispositif essentiel pour le traitement thermique des compacts de poudre, qu'il s'agisse de poudres métalliques, céramiques ou polymères, selon un cycle de température précis.